

ISSN 2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

5.2018

ВІСНИК

**Хмельницького
національного
університету**

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2018, Issue 5, Volume 265

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, 2018, № 5 (265)

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	Войнаренко М. П. , д. е. н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, член-кореспондент Національної академії наук України, проректор з науково-педагогічної та наукової роботи, перший проректор 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. Бубулис Алгимантас, д.т.н. (Литва), Гордєєв А.І., д.т.н., Говорущенко Т.О., д.т.н., Грабко В.В., д.т.н., Диха О.В., д.т.н., Жултовський Б., д.т.н. (Польща), Зубков А.М., д.т.н., Каплун В.Г., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Кіницький Я.Т., д.т.н., Коробко Є.В., д.т.н. (Білорусія), Костогриз С.Г., д.т.н., Лунтовський А.О., д.т.н. (Німеччина), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., д.т.н., Мартинюк В.В., д.т.н., Мельничук П.П., д.т.н., Мясіщев О.А., д.т.н., Натріашвілі Т.М., д.т.н. (Грузія), Нелін Є.А., д.т.н., Павлов С.В., д.т.н., Попов В., доктор природничих наук (Німеччина), Прохорова І.А., д.т.н., Рогатинський Р.М., д.т.н., Ройзман В.П., д.т.н., Рудницький В.Б., д.фіз.-мат.н., Сарібекова Д.Г., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Сілін Р.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Сорокатиї Р.В., д.т.н., Сурженко Є.Я., д.т.н. (Росія), Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Ясній П.В., д.т.н., Tomasz Kalaczynski, PhD (Польща), Elsayed Ahmed Elnashar, PhD (Єгипет)

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

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 1 від 30.08.2018 р.**

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

т	(038-22) 2-51-08	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, 2018
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2018

ЗМІСТ

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

VERA YURIIVNA TILOVA

COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORKS FOR THE EVALUATION OF SOFTWARE QUALITY 7

Е.К. НАЗІРОВ, Т.О. НАЗІРОВА, М.Ю. КАРПЕНКО

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ЗОНИ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ 13

О.В. ОГНЄВИЙ, А.М. ОГНЕВА, В.А. КОВАЛЬ, В.В. ПРИСЯЖНЮК

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ РЕСУРСАМИ В КОРПОРАТИВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ 17

В.Г. РЕЗАНОВА, Н.М. РЕЗАНОВА

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПЛАВІВ ПОЛІМЕРІВ 21

О.В. МАЗУРЕЦЬ

РОЗРОБКА МНОЖИНИ ТЕГІВ ДЛЯ ФОРМАЛЬНОГО ОПИСУ ЕЛЕМЕНТІВ МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ 26

І.О. РОЗЛОМІЙ, Г.В. КОСЕНЮК

ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕНЬ ЦІЛІСНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТУ ШЛЯХОМ ПЕРЕХРЕСНОГО ХЕШУВАННЯ 32

Е.В. ТИХОНОВА, О.М. ЯВОРСКАЯ, В.В. БЕРЕЗОВСКИЙ

ВЕРИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМА МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКА ДЛЯ ТРЕХПОЛЮСНОГО ГРАФА СЕТИ 36

Н.А. ОДЕГОВ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ АППРОКСИМАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ГАУССОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ 42

Ю.М. БОЙКО, І.І. КОВТУН, С.В. ПЕТРАЩУК, Р.А. ТЕРТИЧНИЙ

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ВИВОДІВ ДИСКРЕТНИХ КОМПОНЕНТІВ НА ПЕРЕДАЧУ ДЕФОРМАЦІЙ ВІД ОБ'ЄДНУВАЛЬНОЇ ПЛАТИ 73

Т.М. МАНСУРОВ, Ч.П. АЛИЕВ

АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ 78

В.Т. КОНДРАТОВ

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ. МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО. ЧАСТЬ 3. ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ, УСЛОВИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ 84

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА

АЛГОРИТМІЧНІ МЕТОДИ ВИСОКОТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЕНЬ 100

А.В. ВАСИЛЬЕВА, С.А. ДАРЗНЕК, Ж.Е. ЖЕЛКОБАЕВ, Р.Х. ЦАРБАЕВ

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (АЧХ) И КОЭФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (КЛП) ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (ПАЭ) 106

Д.А. ВОВЧУК, С.Д. ГАЛЮК

ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАМАТЕРІАЛІВ (ОГЛЯД) 116

В.Г. ЦІРУК МЕТОДИКА НАЛАШТУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПІРОТАХОМЕТРА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ТАХОМЕТРА У ВИРОБАХ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ	123
С.М. КВАТЕРНЮК ОЦІНЮВАННЯ ДОСТОВІРНОСТІ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ	128
С.П. КОНОНОВ, М.А. ГРИГОРЕНКО СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ КЕРОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ЗІГ-ГЕНЕРАТОРА	132
І.Ю. ХУДЕЦЬКИЙ, Ю.В. АНТОНОВА-РАФІ, А.В. ШЕВЧУК МЕТОДИКИ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ СЕРЦЕВОГО РИТМУ ДЛЯ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ	136
А.П. САМІЛА ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В КОТУШЦІ СІДЛОПОДІБНОЇ ФОРМИ	140
Н.В. ТІТОВА, С.В. ПАВЛОВ, С.М. ЗЛЕПКО, Е.Л. ПРОТТІ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІКРИ ОСЕТРОВИХ І БІЛОГО АМУРА НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНИХ І МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НЕЧІТКИХ МНОЖИН	146
С.М. ЗЛЕПКО, С.В. ТИМЧИК, І.О. КРИВОРУЧКО, О.С. ЗЛЕПКО МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ СТУДЕНТА УМОВАМ НАВЧАННЯ В ОБРАНОМУ ВИЩОМУ НАВЧАЛЬНОМУ ЗАКЛАДІ	154
А.А. ТАРАНЧУК, С.К. ПІДЧЕНКО, Р.П. ХОПТИНСЬКИЙ, Л.І. ПІЗНЮР МОДЕЛЬ КВАРЦЕВОГО ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ	160
МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ	
Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, А.П. ЛИПИН, С.А. РОМАШКЕВИЧ КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЯТИЗВЕННОГО ЗУБЧАТО-РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА	167
О.Г. КУРПЕ, В.В. КУХАР ОСВОЄННЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ ТОВЩИНОЮ 1,2 ММ НА СТАНІ 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»	171
А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА, О.Ю. ДЕЙНЕКА МІЖФАЗНИЙ РОЗРІЗ В ОРТОТРОПНІЙ ПЛАСТИНЦІ З ПІДСИЛЕНИМ КРУГОВИМ КОНТУРОМ	176
К.О. БРАТКОВСЬКА, Ю.Б. ЛУШ, В.В. КУТИК ВИЗНАЧЕННЯ КЛАСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІФТОВИХ УСТАНОВОК	182
С.М. БОЙКО, І.В. НОСАЧ, С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ, А.В. НЕКРАСОВ, Є.М. КАС'ЯНОВ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ПОТОКУ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ З МЕТОЮ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	186
В.С. НЕЙМАК, С.П. ЛІСЕВИЧ, С.В. СМУТКО, Д.В. ПРИБЕГА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО ПРИВОДУ ДЛЯ ПРЕСОВОГО ОБЛАДНАННЯ МАШИН ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ НА БАЗІ ГІДРОШТОВХАЧІВ	191
С.М. БОЙКО, М.В. КІРЮХІНА, С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ, А.В. НЕКРАСОВ, А.Ю. ДМИТРЕНКО ПЕРЕДУМОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ В МЕЖАХ БЕРЕГОВИХ ЗОН ВОДОЙМ УКРАЇНИ	194
О.О. КОРОТИЧ, В.С. НЕЙМАК, С.І. ПУНДИК, П.С. МАЙДАН ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ПЛІСИРУВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДУЛЯ FLOWWORKS	199

В.П. МІСЯЦЬ, О.Г. ТИМОЩУК, О.О. КОРОТИЧ, С.І. ПУНДИК АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЦИКЛОНА ПИЛОСОСА	202
Л.Б. ДЕМИДЧУК, Д.І. САПОЖНИК ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРО- ТА ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ ПОВЕРХНЕВОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ	209
О.Г. ТИМОЩУК РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЩІЛЬНОСТІ КАНАЛІВ ТА ЕКВІВАЛЕНТНОГО ДІАМЕТРУ КАНАЛІВ БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ	213

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

О.А. АНДРЕЄВА, О.А. ОХМАТ, О.Р. МОКРОУСОВА ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ШКІР	221
Ю.О. БАСОВА, Л.М. ГУБА, А.Б. БОРОДАЙ, О.В. КАЛАШНИК АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВЗУТТЯ	228
О.И. ВОДЗИНСКАЯ, К.Д. КИСЛЕНКО ПРОИЗВЕДЕНИЯ ИСКУССТВА И ЖИВОПИСИ КАК ТВОРЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК В ДИЗАЙН-ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ КОЛЛЕКЦИИ ОДЕЖДЫ	234
С.Ю. БОБРОВА РОЗРОБКА ТРИКОТАЖУ ДЛЯ ЗАХИСТУ РУК ВІД МЕХАНІЧНИХ НЕБЕЗПЕК	242
О.М. ДОМБРОВСЬКА, В.В. МИЦА АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВАРІАТИВНОГО ПРОЕКТУВАННЯ АСОРТИМЕНТНОЇ СТРУКТУРИ ЖІНОЧОЇ СПІДНИЦІ	247
О.А. ДІТКОВСЬКА ДОСЛІДЖЕННЯ АСОРТИМЕНТУ СУЧАСНОГО ДОМАШНЬОГО ЖІНОЧОГО ОДЯГУ ЗА ДАНИМИ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНІВ	251
А.К. КАРМАЛІТА ТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ В СУЧАСНОМУ ІНТЕРСРІ ЖИТЛА	257
О.О. ЄФРЕМОВА, Н.Г. МІРОНОВА, О.П. МАТЕЮК, А.О. ДЯЧУК, С.М. ШЕВЧЕНКО ЕКОЛОГО-ГІГІЄНИЧНА ОЦІНКА СТАНУ Р. ПІВДЕННИЙ БУГ У МЕЖАХ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА ПЕРІОД 2013–2017 РР.	261

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

М.П. СВИТА, Н.М. ЗАЩЕПКІНА ВИКОРИСТАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗІВ ПНЕВМОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ	267
О.О. БРОВАРЕЦЬ ЙМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЗОН ВАРІАБЕЛЬНОСТІ АГРОБІОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАЛЕЖНОЇ ЯКОСТІ ВИКОНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ У РОСЛИННИЦТВІ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ	272
А.О. СТОПАКЕВИЧ, А.М. ТІГАРЄВ, Т.Г. ТІГАРЄВА ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДІЛУ НАФТОВИХ ГАЗІВ В РЕКТИФІКАЦІЙНІЙ КОЛОНІ	284

Ю.П. ЗАСПА

КООПЕРАТИВНА КОНТАКТНА ДИНАМІКА ХВИЛЬОВИХ СТРУКТУР В
ГІПЕРКОМПЛЕКСНОМУ СПІРАЛЬНОМУ ЧАСІ ТА В КОМПЛЕКСНОМУ
ЕВКЛІДОВОМУ ПРОСТОРИ ЯК ОСНОВА ГЕОДИНАМІКИ ТА ХВИЛЬОВИХ
ЗМІН КЛІМАТУ ЗЕМЛІ. ФАКТИЧНИЙ СПАД ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ
ТА ПЕРСПЕКТИВА НОВОГО ЛЬДОВИКОВОГО ПЕРІОДУ 290

М.М. КОСЮК, С.А. КОСТЮК

МЕХАНІЧНИЙ ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ МАШИНИ УДАРНОЇ ДІЇ ДЛЯ СТАТИКО-
ІМПУЛЬСНОГО ЗМІЩЕННЯ 302

UDC 681.3

VERA YURIIVNA TITOVA

Khmelnytsky National University

COMPARATIVE ANALYSIS OF NEURAL NETWORKS FOR THE EVALUATION OF SOFTWARE QUALITY

The problem of software quality evaluation is considered in this paper. Software quality is evaluated using a quality model. The quality model consists of software quality metrics classified into a hierarchical tree structure. The upper level of this structure consists of quality characteristics, and the lower level consists of software quality attributes. Based on the analysis of these characteristics and attributes, the authors determine that current quality model is not formalized. So, they propose the formalized model of software quality. This model is the basis for an unsupervised neural network for software quality evaluation. Based on the comparative analysis of clustering validation indexes a Kohonen SOM is chosen. The model and the neural network developed in this paper become the basis for developing a software quality evaluation system.

Keywords: Kohonen SOM, ART-network, Clustering Validation Indexes, Software Quality Model, Neural Networks, Unsupervised Learning, Comparative Analysis.

В.Ю. ТИТОВА

Хмельницький національний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В роботі розглядається проблема оцінки якості програмного забезпечення. Якість програмного забезпечення оцінюється за допомогою моделі якості. Модель якості складається з показників якості програмного забезпечення, класифікованих у ієрархічну структуру дерева. Верхній рівень цієї структури складається з характеристик якості, а нижній рівень складається з атрибутів якості програмного забезпечення. На підставі аналізу цих характеристик та атрибутів автори визначають, що поточна модель якості є неформалізованою. А тому, вони пропонують формалізовану модель якості програмного забезпечення. Зазначена модель є основою нейронної мережі, що навчається без вчителя, для оцінки якості програмного забезпечення. На основі порівняльного аналізу показників кластеризації авторами обрано нейронну мережу Кохонена. Модель і нейронна мережа, розроблені в даній статті, є наступним кроком для розробки системи оцінки якості програмного забезпечення.

Ключові слова: ART-мережа, індекси перевірки кластеризації, модель якості програмного забезпечення, нейронні мережі, неконтрольоване навчання, порівняльний аналіз.

Introduction. Improving of software quality is one of the important and actual tasks of software development. The solution of this problem is especially important for critical software, which is related to the safety of people.

There is no single approach to software quality evaluation for today. So, the development of regulatory framework that defines software quality requirements and the development of methods for the evaluating implementation of these requirements are needed for software quality improving [1].

One of the ways for the evaluation of software quality is evaluation using a quality model. There are several software quality models for today. Their comparative analysis is presented in this study [1]. Based on it, we can conclude that the software quality model described here [2] is the most relevant for software development.

This quality model consists of two parts [2]: a product quality model and a quality in use model. The characteristics and subcharacteristics of these two models are shown in Fig. 1 [2]:

These characteristics and subcharacteristics are the input data for the evaluation of software quality. They are divided into [2]:

- descriptive, that describe the set of tools and general properties of an object, its functions, security and importance;
- quantitative, which can be measured and numerically compared with requirements;
- qualitative, which are determined by expert method.

So, the using of mathematical methods to solve the problem of software quality evaluation is impossible because the input data is heterogeneity. The formalization of the software quality model enables to simplify the solution of this problem and, as a result, to improve the quality of using software.

Formalized model of software quality. For the formalization of the model we use sets theory apparatus. We mark total quality - Q . It's calculated by the values of product quality characteristics Q_P and by the values of quality in use characteristics Q_U . Q_P is determined from the sets of characteristics:

- functional suitability FS , $FS = \{fs_1, fs_2, fs_3\}$, where fs_1 - functional completeness, fs_2 - functional correctness, fs_3 - functional appropriateness;
- performance efficiency PE , $PE = \{pe_1, pe_2, pe_3\}$, where pe_1 - time behavior, pe_2 - resource utilization, pe_3 - capacity;

Product Quality Model		Quality in use Model	
(Sub)Characteristic	(Sub)Characteristic	(Sub)Characteristic	(Sub)Characteristic
Functional suitability	Reliability	Effectiveness	
Functional completeness	Maturity	Efficiency	
Functional correctness	Availability	Satisfaction	
Functional appropriateness	Fault tolerance	Usefulness	
Performance efficiency	Recoverability	Trust	
Time behaviour	Security	Pleasure	
Resource utilization	Confidentiality	Comfort	
Capacity	Integrity	Freedom from risk	
Compatibility	Non-repudiation	Economic risk mitigation	
Co-existence	Accountability	Health and safety risk mitigation	
Interoperability	Authenticity	Environmental risk mitigation	
Usability	Maintainability	Context coverage	
Appropriateness recognizability	Modularity	Context completeness	
Learnability	Reusability	Flexibility	
Operability	Analysability		
User error protection	Modifiability		
User interface aesthetics	Testability		
Accessibility	Portability		
	Adaptability		
	Installability		
	Replaceability		

Fig. 1. Quality model characteristics and subcharacteristics

- compatibility C , $C = \{c_1, c_2\}$, where c_1 - co-existence, c_2 - interoperability;
- usability U , $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$, where u_1 - appropriateness recognizability, u_2 - learnability, u_3 - operability, u_4 - user error protection, u_5 - user interface aesthetics, u_6 - accessibility;
- reliability R , $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$, where r_1 - maturity, r_2 - availability, r_3 - fault tolerance, r_4 - recoverability;
- security S , $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$, where s_1 - modularity, s_2 - confidentiality, s_3 - integrity, s_4 - modifiability, s_5 - testability;
- maintainability M , $M = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}$, where m_1 - modularity, m_2 - reusability, m_3 - non-repudiation, m_4 - accountability, m_5 - authenticity;
- portability P , $P = \{p_1, p_2, p_3\}$, where p_1 - adaptability, p_2 - installability, p_3 - replaceability.

From the definitions of characteristics we can conclude that they are interrelated. For example, usability depends on performance efficiency, and reliability depends on maintainability. So, to determine product quality, we use a multiplicative index or the product of sets.

$$Q_p = FS \times PE \times C \times U \times R \times S \times M \times P \tag{1}$$

The quality of use consists of characteristics or the sets of characteristics: effectiveness - es ; efficiency - ey ; satisfaction - $ST, ST = \{st_1, st_2, st_3, st_4\}$, where st_1 - usefulness, st_2 - trust, st_3 - pleasure, st_4 - comfort; freedom from risk - $FR, FR = \{fr_1, fr_2, fr_3\}$, where fr_1 - economic risk mitigation, fr_2 - health and safety risk mitigation, fr_3 - environmental risk mitigation; context coverage - $CC, CC = \{cc_1, cc_2\}$, where cc_1 - context completeness, cc_2 - flexibility.

These characteristics are dependent on the characteristics of product quality. For example, effectiveness depends on the characteristics of functionality suitability, reliability, usability, maintainability, portability; satisfaction - on the characteristics of functionality suitability, portability and usability.

So, to evaluate total quality, we use the multiplicative index again.

$$Q = Q_p \times Q_U \tag{2}$$

We can present the formalized software quality model in the following form:

$$Q = (FS \times PE \times C \times U \times R \times S \times M \times P) \times Q_U \tag{3}$$

A similar model has already been considered in [3], but it has the following drawbacks. Firstly, it doesn't take into consideration the relationships between the product quality parameters. Secondly, it does not take into consideration the type of software. The latter is important, since different quality parameters can be important for the different types of software.

We determine the following types of software based on software classification [4]:

- critical software or the software of high importance - is the software that performs critical functions that are important to security, that is, software whose failure to perform functions or its misuse or negligence can become catastrophic or critical consequences. Automated systems in the space industry, the nuclear industry,

medicine and other spheres are the example of such software;

- the software of medium importance – is the software whose failure to perform functions or its misuse or negligence can become financial or information losses, but not catastrophic or critical consequences. System software and some application programs are the example of such software;

- the software of low importance - is the software whose failure to perform functions or its misuse or negligence can become the moral dissatisfaction of users and haven't other consequences. Computer games and other entertainment programs are the example of such software.

So, we have the set of software types $CL = \{cl_1, cl_2, cl_3\}$, where cl_1 - critical software, cl_2 - the software of medium importance, cl_3 - the software of low importance. Given relationships between quality characteristics and software types, we have the following quality model (4).

$$Q = ((FS \times PE \times C \times U \times R \times S \times M \times P) \times Q_U) \times CL \quad (4)$$

We replace sets by their corresponding characteristics and subcharacteristics, and we obtain the following formula (5), which is the Formalized Model of software quality.

We can conclude from the analysis of the model, that:

- software quality depends on the large number of interrelated characteristics;
- the evaluation of software quality cannot be reduced to usual numerical calculations.

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} (fs_1, pe_1, c_1, u_1, r_1, s_1, m_1, p_1, es, ey, st_1, fr_1, cc_1, cl_1), \\ (fs_1, pe_1, c_1, u_1, r_1, s_1, m_1, p_1, es, ey, st_1, fr_1, cc_1, cl_2), \\ (fs_1, pe_1, c_1, u_1, r_1, s_1, m_1, p_1, es, ey, st_1, fr_1, cc_1, cl_3), \\ (fs_1, pe_1, c_1, u_1, r_1, s_1, m_1, p_1, es, ey, st_1, fr_1, cc_2, cl_1), \\ (fs_1, pe_1, c_1, u_1, r_1, s_1, m_1, p_1, es, ey, st_1, fr_1, cc_2, cl_2), \\ (fs_1, pe_1, c_1, u_1, r_1, s_1, m_1, p_1, es, ey, st_1, fr_1, cc_2, cl_3), \\ \vdots \\ (fs_3, pe_3, c_2, u_6, r_4, s_5, m_5, p_3, es, ey, st_4, fr_3, cc_1, cl_1), \\ (fs_3, pe_3, c_2, u_6, r_4, s_5, m_5, p_3, es, ey, st_4, fr_3, cc_1, cl_2), \\ (fs_3, pe_3, c_2, u_6, r_4, s_5, m_5, p_3, es, ey, st_4, fr_3, cc_1, cl_3), \\ (fs_3, pe_3, c_2, u_6, r_4, s_5, m_5, p_3, es, ey, st_4, fr_3, cc_2, cl_1), \\ (fs_3, pe_3, c_2, u_6, r_4, s_5, m_5, p_3, es, ey, st_4, fr_3, cc_2, cl_2), \\ (fs_3, pe_3, c_2, u_6, r_4, s_5, m_5, p_3, es, ey, st_4, fr_3, cc_2, cl_3), \end{array} \right. \quad (5)$$

So, the problem of software quality evaluation belongs to the difficult formalized tasks. Today, artificial neural networks are one of the perspective ways to solve such problems. So, we use a neural network method to evaluate software quality.

Analysis of neural networks for software quality evaluation. One of the neural networks for software quality evaluation is considered in this paper [3]. It belongs to the supervised neural networks.

However, in the process of training this neural network, difficulties arise with the accuracy of output training sets. Since the data obtained through expert evaluation can be incorrect due to the subjectivity of experts. For example, different experts from developers, users or customers can differently evaluate software quality for the same input data. And the data obtained through the testing of software matching with requirements for it can be incorrect, because the test results are determined by the values "passed" and "not passed," without specifying the degree of passing. So, we decide to use an unsupervised neural network to avoid difficulties in the formation of training sets.

Among the most perspective unsupervised neural networks for today are an ART-2 network and a Kohonen SOM. So, we compare these two networks based on a training data set. The training data set is the values of quality characteristics and subcharacteristics described above. The size of the training set is 150 that match to 150 tested programs. The values of the input data are determined using the method described here [5]. Software testing takes place on the base of software of the Khmelnytsky National University information and computer center.

For the neural network comparative analysis we use the following clustering validation indexes [6–8]:

- Davies–Bouldin Index (DBI) - is a function of the ratio of sum of within-cluster scatter to between-cluster separation. The ideal DBI presents minimal ratio of within-cluster scatter and between-cluster separation; therefore, minimizing within-cluster scatter and maximizing between-cluster separation are desired;

- Calinski–Harabasz Index (CHI) - is a function of the ratio of sum of squares among the clusters to sum of squares within the clusters. A better clustering result is indicated by a higher CH value;

- Ray–Turi Index (RTI) - is a function of the ratio of the intra-cluster distance to minimal of inter-cluster distance. The clustering result which gives a minimum RTI tells us what the ideal number of clusters is since minimizing inter-cluster distance and maximizing inter-cluster one are presented;

- Dunn Index (DI) - is a function which takes the minimal ratio of inter-cluster distance to maximal intra-cluster distance. The main goal of DI is to maximize inter-cluster distances and minimize intra-cluster distances. Therefore, the number of clusters that maximizes DI is taken as the ideal clustering result.

The number of output clusters can be two, three, four, five or six.

If the number of clusters is two, then they take the following values: software needs rework and software doesn't need rework.

If the number of clusters is three, then they take the following values: software needs full rework; software needs rework, but not a full one; software doesn't need a rework.

If the number of clusters is four, then they take the following values: software needs full rework; software

needs large rework; software needs little rework; software doesn't need any rework.

If the number of clusters is five, then they take the following values: software needs full rework; software needs large rework; software needs medium rework; software needs little rework; software doesn't need rework.

If the number of clusters is six, then they take the following values: software needs full rework; software needs large rework; software rather needs large rework than little rework; software rather needs little rework than large rework; software needs little rework; software doesn't need rework.

We implement both neural networks in Matlab. The results of networks comparison are shown in Fig. 2.

We can conclude from this comparison that the Kohonen SOM shows the best results for all indexes. Therefore, we choose this neural network for software quality evaluation.

The optimal clusters number is also selected from the results of comparison. Three indexes have the maximum value for four clusters. The value of the fourth index is satisfactory for this clusters number. So, we evaluate software quality by four classes: software needs full rework; software needs large rework; software needs little rework; software doesn't need any rework.

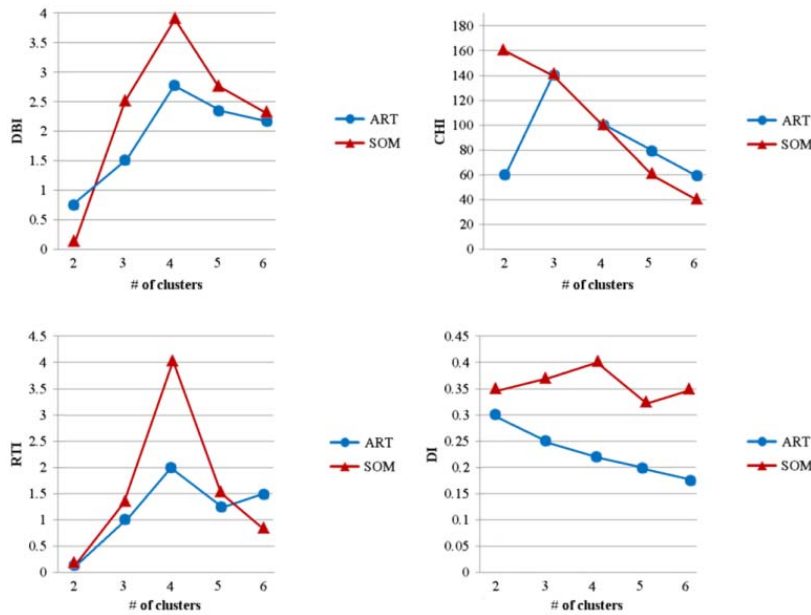


Fig. 2. The results of networks comparison

Results of experiments. We test selected neural network for software quality evaluation in the training set. The fragment of this set is shown in Table 1.

Table 1

Training fragment set for the neural network for software quality evaluation										
	Soft. No.1	Soft. No.2	Soft. No.3	Soft. No.4	Soft. No.5	Soft. No.6	Soft. No.7	Soft. No.8	Soft. No.9	Soft. No.10
fc ₁	1	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1	0.9	1
fc ₂	1	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1	0.9	1
fc ₃	1	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	1	0.9	1
pe ₁	1	1	1	1	0.9	0.9	1	1	1	1
pe ₂	1	1	1	1	0.9	0.9	1	1	1	1
pe ₃	1	1	1	1	0.9	0.9	1	1	1	1
c ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
c ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
u ₄	1	0.9	0.85	0.8	1	1	0.8	1	1	1
u ₅	1	1	1	0.9	1	1	0.9	1	1	1
u ₆	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
r ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
r ₂	1	1	1	1	0.8	1	1	1	1	1
r ₃	1	0.9	0.9	0.8	0.7	0.9	0.8	1	1	1
r ₄	1	1	1	0.9	0.7	0.9	0.9	1	1	1
s ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Table 1 (continue)

	Soft. No.1	Soft. No.2	Soft. No.3	Soft. No.4	Soft. No.5	Soft. No.6	Soft. No.7	Soft. No.8	Soft. No.9	Soft. No.10
s ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s ₄	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s ₅	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
m ₁	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1
m ₂	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1	1
m ₃	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1	1
m ₄	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1
m ₅	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1	1
p ₁	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1
p ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
p ₃	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1
es	1	1	1	1	0.75	1	1	1	1	1
ey	1	1	1	1	0.6	1	1	1	0.9	0.9
st ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.95
st ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.95
st ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.95
st ₄	1	1	1	1	1	1	1	1	0.8	0.95
fr ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fr ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
fr ₃	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
cc ₁	1	1	1	1	0.8	1	1	1	1	1
cc ₂	1	1	1	0.9	0.6	0.9	0.9	1	1	1
cl ₁	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
cl ₂	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
cl ₃	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1

Input values consist of quality subcharacteristics and software classes. The values are in the range [0..1]. A better subcharacteristics result is indicated by a higher value. The software classes contain 1 in the corresponding class and 0 in the other classes. The set size is 10. The results of neural network work are shown in Fig. 3.

Red cluster corresponds to software that needs full rework. Software *No.5* matches this class. Yellow cluster corresponds to software that needs large rework. Software *No.6* and *No.7* match this class. Blue cluster corresponds to software that needs little rework. Software *No.3*, *No.4* and *No.9* match this class. Green cluster corresponds to software that doesn't need any rework. Software *No.1*, *No.2*, *No.8*, and *No.10* match this class.

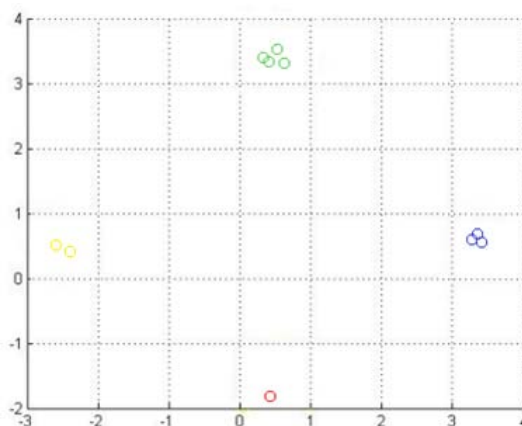


Fig. 3. Results of clustering

At the similar training set, we test a supervised neural network based on formalized quality model described here [3]. The test results are as follows:

- $Q_1 = 1$, $Q_2 = 0.98$, $Q_3 = 0.95$, $Q_8 = 0.98$, $Q_{10} = 0.95$. These values correspond to 100% quality, 98% quality, 95% quality, respectively, and they mean that software doesn't need rework;
- $Q_4 = 0.88$, $Q_6 = 0.85$, $Q_7 = 0.85$, $Q_9 = 0.88$. These values correspond to 88% quality and 85% quality, and they mean that software needs little rework;
- $Q_5 = 0.65$. This value corresponds to 65% quality. It means that software needs large rework.

These results show us that:

- the evaluation of software quality without considering the relationship between the subcharacteristics of the quality model compensates for the worst values of some subcharacteristics by the best values of others. So, the total quality value is overestimated;

- the evaluation of software quality without considering software class doesn't take into account the importance of quality model subcharacteristics. As a result, the total quality value is overestimated again.

So, we can conclude that the formalized software quality model described in this study is more relevant for the problem of software quality evaluation.

Conclusions and future work. In this study we analyze and formalize conditions that characterize the software quality model. This lets us to develop the Formalized Model of software quality.

The analysis of this model shows that to solve the problem of software quality evaluation it's better to use unsupervised neural networks. An ART-2 network and a Kohonen SOM are the most perspective networks of this type for today.

For the analysis of these networks we use the training set that consists of the values of quality characteristics and subcharacteristics. The size of this training set is 150 that match to 150 tested programs.

Based on the comparative analysis of these two networks, we conclude that the Kohonen SOM better suits for solving the problem of software quality evaluation. So, we choose this neural network to solve this problem.

Developed model and neural network are the basis for developing a software quality evaluation system. We expect that the using of this system automates a software quality evaluation process. As a result, this enables to avoid subjectivity when evaluating software quality, to improve software quality and to make the software quality evaluation process more economically profitable.

References

A Review of Software Quality Models for the Evaluation of Software Products / José P. Miguel, David Mauricio, Glen Rodríguez. // International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA), Vol.5, No.6, November 2014.

ISO/IEC 25010:2011 - Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models.

Neiromerezhnyi metod dlia vyznachennia yakosti prohramnoho zabezpechennia krytychnoho zastosuvannia / V.Iu. Titova // Shtuchnyi intelekt. – 2012. – № 4. – P. 594–601.

ISO/IEC 26514:2008 - Systems and software engineering - Requirements for designers and developers of user documentation.

Nechitka neironna merezha dlia vyznachennia vidpovidnosti rezultativ testuvannia prohramnoho zabezpechennia krytychnoho zastosuvannia vymoham / V.Iu. Titova // Shtuchnyi intelekt. – 2013. – № 4. – P. 548–554.

Cheng-Ching Chang, Ssu-Han Chen. A comparative analysis on artificial neural network-based two-stage clustering. // Cogent Engineering. – vol. 2, 2015. - Issue 1. - <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2014.995785>

On the number of clusters in block clustering algorithms / M. Charrad, Y. Lechevallier, M. B. Ahmed, G. Saporta. // Proceedings of the Twenty-Third International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, 2010. – P. 392–397.

A new distance measurement for clustering time-course gene expression data / G. Chen, Y. Dai. // Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS San Francisco, CA, 2004. – P. 2929–2932.

Рецензія/Peer review : 29.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 18.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Боровик О.В.

УДК 004.93

Е.К. НАЗІРОВ, Т.О. НАЗІРОВА, М.Ю. КАРПЕНКО
Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ЗОНИ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ

В роботі проведено обґрунтування застосування нейронних мереж для прогнозування надзвичайних ситуацій та етапи побудови нейронної мережі для моделювання надзвичайних ситуацій. Мета роботи досягається розвитком науково-технічних основ для технічної реалізації комплексної в межах України системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки. Прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій та визначення місця розташування є актуальним завданням, яке вимагає постійного і ефективного рішення. У статті описані принципи побудови та робота системи розпізнавання надзвичайних ситуацій з використанням нейронних мереж.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, охоплення, автоматизована система, акустичні сигнали, надзвичайні ситуації, потенційно небезпечний об'єкт, системи оповіщення, громадський захист населення, інформування.

E.K. NAZIROV, T.O. NAZIROVA, M.YU. KARPENKO
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

INFORMATION TECHNOLOGY BASED ON A NEURAL NETWORK FOR SIGNAL PROCESSING OF A ZONE OF AN EMERGENCY

The paper substantiates the application of neural networks for prediction of emergency situations and the stages of building a neural network for simulation of emergency situations. The purpose of the work is achieved by developing scientific and technical bases for the technical implementation of a comprehensive within Ukraine monitoring, prevention and liquidation system of natural and man-made emergency situations and ensuring environmental safety. Forecasting emergencies and location determination is an urgent task that requires a permanent and effective solution. The article describes the principles of the construction and operation of the system for the recognition of emergency situations using neural networks. Considered apparatus and analysis of the need to use a neural network, to predict the physical parameters the emerging problem. Fulfilled the analysis of the chosen structure and neural networks, which should be used to predict the physical parameters. In article proposed model of a neural network to solve the problem of prediction. Also presented, the mathematical formula for visual understanding of the structure of neural networks and their work. The article is devoted to the problem of emergencies prevention using modern methods of analysis of acoustic data. Emergencies arise in the conditions of extraordinary situations and management in emergency situations characterized by the need for work in the absence of information, the high rate of change in the situation, the need for operational formation of the most effective solutions, which have high efficiency, which imposes requirements to minimize the time and losses in the elimination of emergency situations. Results of the study can be used for analysis and modelling of stability of emergency service that is for evaluation of the emergency or potentially dangerous object.

Keywords: emergency situation, coverage, automated system, acoustic signals, emergency, potentially dangerous object, notification systems, civil protection of the population, informing.

Постановка задачі

Проблеми попередження, раннього виявлення та ліквідації надзвичайних ситуацій набувають все більш гострого і актуального характеру, тому що згідно зі статистичними даними, їх кількість неуклінно зростає кожного року, як наслідки зростають втрати та збитки. Ситуація, що складається вимагає вживання заходів щодо впровадження сучасних технологій раннього виявлення епіцентру небезпечної зони та ефективного реагування на безпеки. Діяльність з попередження надзвичайних ситуацій є важливішою, ніж їх ліквідація.

Статтю присвячено проблематиці попередження виникнення надзвичайних ситуацій за допомогою використання штучних нейронних мереж для аналізу акустичних даних які супроводжують докритичні та критичні ситуації. Надзвичайні ситуації виникають в умовах екстраординарних ситуацій і управління в умовах кризового стану відрізняється необхідністю роботи при нестачі інформації, високим темпом зміни ситуації, потребою оперативного формування найбільш ефективних рішень, що відрізняються високою результативністю, що накладає вимоги до мінімізації часу і втрат при ліквідації надзвичайної ситуації.

Метою роботи є розвиток науково-технічних основ для технічної реалізації комплексної, в межах України, системи акустичного моніторингу, для попередження та управління ліквідацією надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Актуальною задачею залишається питання розроблення нової технології, що дасть змогу отримати усю повноту необхідної інформації. Сформульовано основні

технічні складники проблем та шляхи їх усунення для покращення якості та підвищення інформативності контролю за НС.

Аналіз досліджень та публікацій. Сучасний стан політичної ситуації в Україні приніс нові вимоги суспільства до глобальних заходів по забезпеченню захищеності функціонування об'єктів економіки та життєдіяльність населення. Дослідженнями даної проблеми присвятили свої праці І.А. Чуб, М.В. Новожилова, John J. Fay, David Patterson, Попов В.М., Michael Khalemsky, David G. Schwartz, A. Malizia, Т. Onorati та багато інших [1–4]. В роботах науковців доведено що, для будь-якої держави є актуальною необхідність технічної реалізації заходів попередження та недопущення впливу небезпечних факторів на процес життєдіяльності населення та функціонування різного роду об'єктів держави. Це доводить актуальність наряду дослідження в цій області. Проте переважна більшість робіт науковців пов'язана з використанням класичних підходів, що при швидкому розвитку технологій уже не відповідає запитам щодо інформатизації галузі та створенню ефективних методів швидкого реагування. Недостатньо уваги приділено моніторингу соціальних надзвичайних ситуацій, який потребує обробки різноманітної інформації з різноманітних джерел, що вимагає впровадження додаткових засобів її збору й аналізу.

Метою даної роботи є дослідження перспективних напрямків та технологій використання нейронних мереж для реєстрації покриття акустичних сигналів надзвичайних ситуацій. Мета роботи досягається впровадженням сучасних науково-технічних основ для реалізації комплексної системи моніторингу у державі, попередження населення про загрозу та ліквідації надзвичайних ситуацій природного, техногенного характеру та забезпечення соціальної безпеки населення.

Оцінювання ефективності тієї чи іншої системи, що використана для попередження НС, можливо лише за подіями, які виникають вже після виникнення ситуації. Тому передбачення некерованих аспектів випадків перед прийняттям рішення, дає можливість зробити найкращий вибір, який без прогнозування міг би бути не таким результативним.

Використання технологій нейронних мереж, як потужний інтелектуальний інструмент, дають змогу полегшити керівникові процес перебігу прийняття важливих і неочевидних рішень в умовах великої невизначеності, дефіциту часу і обмежених інформаційних ресурсів. Притаманною рисою сучасних нейронних мереж є їх здатність моделювати свої результати залежно від мінливості зовнішнього середовища, з урахуванням нечітких та прихованих закономірностей інформаційного потоку даних. Водночас алгоритми навчання не вимагають будь-яких попередніх знань про наявні, в предметній ділянці, взаємозв'язки – для ефективного використання, необхідно тільки підібрати достатнє число прикладів, які описують поведінку у минулому спроектованої системи [5].

На рис. 1 графічно представлено архітектури нейронних мереж та задачі, для яких вони використовуються, а також спосіб їх навчання.

Прогнозування – передбачення розвитку майбутніх надзвичайних ситуацій. Нехай наявні значення n дискретних відліків $\{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)\}$ у послідовні моменти часу $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$. Тоді задача прогнозування полягає в передбаченні $y(t_{n+1})$ у деякий момент часу t_{n+1} . Метою прогнозування є можливість зменшення ризику при прийнятті рушень. Забезпечивши систему наявністю більших ресурсів, можливо збільшити точність прогнозу та зменшити економічні наслідки, пов'язані з невизначеністю при прийнятті рішень.

Для розв'язку задачі прогнозування часових рядів фахівець вибирає довільний часовий ряд, що містить N відліків, і розбиває його на множини: навчальну, тестуючу та контрольну вибірки, які потім подаються на вхід мережі [6]. Результатом прогнозування є значення часового ряду в необхідний момент часу. Для підвищення якості передбачення необхідно зробити попередню обробку інформації. Оскільки часовий ряд – це послідовність числових відліків, то попередня обробка зводиться до масштабування значень відліків з ціллю їх приведення до єдиного діапазону. Кожна вибірка – це дискретна функція, задана в точках на інтервалі $[0, N]$ з кроком 1, де N – максимальне значення аргументу цієї функції.

Роль нейронної мережі в вирішенні задачі прогнозування полягає в передбаченні майбутньої реакції спроектованої системи за її попередньою поведінкою. Мережа виробляє розв'язок, котрий буде визначати найбільш імовірне значення послідовності $x_{(k)}$ у теперішній момент k , на основі інформації про значення змінної x у моменти, попередні прогнозуванню $x_{(k-1)}, x_{(k-2)}, \dots, x_{(k-n)}$.

Для кореляції ваг коефіцієнтів мережі використовується фактична похибка прогнозування $\epsilon = x_{(k)max}$



Рис. 1. Архітектура нейронних мереж

- $x_{(k-1)\min}$ і значення похибки в попередні моменти часу.

Багатошаровий перцептрон або мережа радіально базисної функції – архітектура, яка найбільше підходить для вирішення поставленої задачі. Для розв'язку задачі прогнозування слід використовувати узагальнено-регресійну мережу. Нейронна мережа такого типу повинна складатися з двох прихованих шарів: шару радіально базисної функції та шару перцептрона,

конфігурація якої наведено на рис. 2.

Результат роботи першого шару є інформація про дані навчальних випадків надзвичайної ситуації або ж їх кластери, після обробки результатів, ці дані надходять на вхід другого прихованого шару. Вихідний сигнал i -го нейрону другого проміжного шару обчислюється за формулою (1):

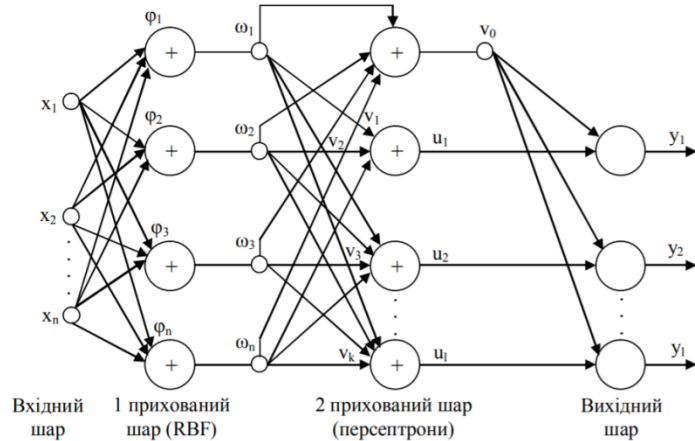


Рис. 2. Структура узагальнено-регресійної нейронної мережі

$$u_i = \sum_{i=1}^k v_i \tag{1}$$

де k – число нейронів в RBF-шарі.

Для одержання вагових коефіцієнтів i -го нейрону RBF-шарі позначимо коефіцієнти як ω_1 , та отримаємо суми ваг за виразом (2):

$$v_0 = \sum_{i=1}^k \omega_i \tag{2}$$

З цього можна зробити висновок, що вихідний шар поділяє зважені суми на суму ваг і видає кінцевий прогноз, який позначимо y_1 (3)

$$y_1 = \frac{u_i}{v_0} \tag{3}$$

Кінцеве значення мережі має імовірнісний вигляд, для спрощення інтерпретації. Навчання мережі необхідно виконувати для кожного часового ряду, щоб уникнути ситуації, при якій спроба прогнозування на ненавченому ряду, приведе до хибного результату рис. 3.

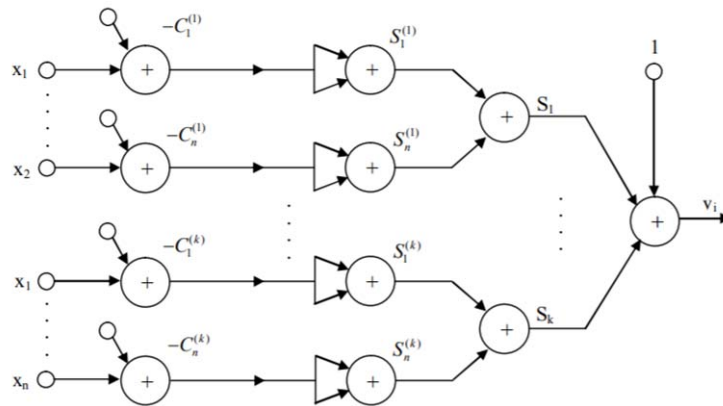


Рис. 3. Структурна схема першого проміжного шару

Висновки

Проведені дослідження показали великі потенційні можливості використання штучних нейронних мереж і підтвердили їх ефективність в задачах прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій будь-якого характеру. Використання технологій нейронних мереж, як потужний технологічний інструмент, дають змогу полегшити спеціалісту процес прийняття важливих і неочевидних рішень в умовах невизначеності, дефіциту часу і обмежених інформаційних ресурсів. При цьому алгоритми навчання не вимагають будь-яких попередніх знань про наявні в предметній ділянці взаємозв'язки, необхідно тільки підібрати достатнє число прикладів, які описують поведінку модельованої у минулому системи.

Завданнями подальших досліджень є: дослідження можливості використання нейронної мережі до

обробки аудіосигналів зони НС. Також планується подальша робота над збором масиву сигналів надзвичайної ситуації за допомогою штучного інтелекту.

Література

1. Математические модели и методы проектирования систем раннего обнаружения пожара : монография / И.А. Чуб, М.В. Новожилова, В.А. Андронов. – Харьков : НУЦЗУ, 2014. – 148 с.
2. Emergency Management / John J. Fay, David Patterson [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128092781000153>
3. Попов В.М. Показатели эффективности региональной системы техногенной безопасности / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2(20). – С. 32–41.
4. Львов А.В. Триангуляционная система определения координат источника звука [Электронный ресурс] / А.В. Львов, М.Н. Агапов, А.И. Тищенко // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 159-162. – Режим доступа : http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2010_02/pdf/158lvov.pdf
5. Nazirov E. K. Система сповіщення в надзвичайних ситуаціях “АСЕН” [Електронний ресурс] / E. K. Nazirov, T. A. Nazirova // Науковий вісник НЛТУ України. – 2018. – 28 (1). – С. 140–144. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15421/40280128>
6. Emergency Response Community Effectiveness: A simulation modeler for comparing Emergency Medical Services with smartphone-based Samaritan response / Michael Khalemsky, David G.Schwartz. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923617301252>
7. Назиров Э.К. Использование звукометрии в персональной системе оповещения о наступлении чрезвычайной ситуации / Э.К. Назиров // Комп’ютерні технології в міському та регіональному господарстві : матер. Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., Харків-2015: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – С. 155–156.
8. An ontology for emergency notification systems accessibility / A. Malizia, T. Onorati, P. Diaz, I. Aedo, F. Astorga-Paliza [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008768>
9. Application of satellite navigation system for emergency warning and alerting / Sue LynnChoy, John Handmer, Joshua Whittaker, Yuki Shinohara, Tomohiro Hatori, Naohiko Kohtake. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019897151630031X>
10. GSMA Intelligence Global Data [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу : <https://www.gsmainelligence.com/>.
11. Державна служба України з надзвичайних ситуацій [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.dsns.gov.ua/>.

References

1. Matematicheskie modeli i metody proektirovaniya sistem rannego obnaruzheniya pozhara : monografiya / I.A. Chub, M.V. Novozhilova, V.A. Andronov. – Har'kov : NUCZU, 2014. – 148 s.
2. Emergency Management / John J. Fay, David Patterson [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128092781000153>
3. Popov V.M. Pokazateli jeffektivnosti re- gional'noj sistemy tehnogennoj bezopasnosti / V.M. Popov, I.A. Chub, M.V. Novozhilova // Vestnik Ko- mandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'. – 2014. – № 2(20). – S. 32–41.
4. L'vov A.V. Trianguljacionnaja sistema opredelenija koordinat istochnika zvuka [Jelktronnyj resurs] / A.V. L'vov, M.N. Agapov, A.I. Tishhenko // Polzunovskij vestnik. – 2010. – № 2. – S. 159-162. – Rezhim dostupa : http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2010_02/pdf/158lvov.pdf
5. Nazirov E. K. Sistema spovishhennja v nadzvichajnih situacijah “ASEN” [Elektronnij resurs] / E. K. Nazirov, T. A. Nazirova // Naukovij visnik NLTU Ukraïni. – 2018. – 28 (1). – S. 140–144. – Rezhim dostupu : <https://doi.org/10.15421/40280128>
6. Emergency Response Community Effectiveness: A simulation modeler for comparing Emergency Medical Services with smartphone-based Samaritan response / Michael Khalemsky, David G.Schwartz. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923617301252>
7. Nazirov Je.K. Ispol'zovanie zvukometrii v personal'noj sisteme opoveshhenija o nastuplenii chrezvychajnoj situacii / Je.K. Nazirov // Kompjuterne tehnologii v mis'komu ta regional'nomu gospodarstvi : mater. Mizhnar. nauk.-prakt. internet-konf., Harkiv-2015: HNUMG im. O. M. Beketova, 2015. – S. 155–156.
8. An ontology for emergency notification systems accessibility / A. Malizia, T. Onorati, P. Diaz, I. Aedo, F. Astorga-Paliza [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008768>
9. Application of satellite navigation system for emergency warning and alerting / Sue LynnChoy, John Handmer, Joshua Whittaker, Yuki Shinohara, Tomohiro Hatori, Naohiko Kohtake. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019897151630031X>
10. GSMA Intelligence Global Data [Elektronnij resurs]. – 2018. – Rezhim dostupu : <https://www.gsmainelligence.com/>.
11. Derzhavna sluzhba Ukraïni z nadzvichajnih situacij [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.dsns.gov.ua/>.

Рецензія/Peer review : 01.12.2017

Надрукована/Printed :

Рецензент: д. т. н., проф. М.В. Новожилова

**ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ РЕСУРСАМИ В
КОРПОРАТИВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Стаття присвячена дослідженню теоретико-методологічних засад та практичних рекомендацій застосування технології програмних агентів для формування ефективної системи управління інформаційними ресурсами на корпоративних підприємствах. Сучасні методи і засоби управління інформаційними ресурсами включають в себе різні способи структуризації інформації, управління потоками робіт і системне управління. Новий напрям розвитку сучасних інтелектуальних інформаційних технологій дає змогу перейти на більш інтелектуальний рівень взаємодії користувача з програмним і апаратним забезпеченням, пов'язаний з використанням автономних програмних агентів. Для коректного та ефективного застосування технології програмних агентів необхідні дослідження загальних принципів і механізмів їх взаємодії із розподіленою інформаційною системою. Це передбачає розробку формалізованого опису програмних агентів як складної і автономної системи. Основні завдання, які можна вирішувати за допомогою програмних агентів: моніторинг інформаційних ресурсів, захист даних інформаційних ресурсів корпоративних інформаційних систем, управління потоками взаємопов'язаних завдань користувача на основі автономних сценаріїв, управління мережевими ресурсами розподілених обчислювальних систем, пошук і аналіз даних в мережах.

Ключові слова: автономний агент, інформаційні ресурси, корпоративні інформаційні системи, програмний агент, розподілені інформаційні системи.

O.V. OGNEVY, A.M. OGNEVA, B.A. KOVAL, V.V. PRYSYAZHNYUK
Khmelnitsky National University

OBOLIVOSTI UPRAVLINNYA IN-INFORMATIVE RESOURCES IN CORPORATE INFORMATIVE SYSTEMS

The article is devoted to the study of theoretical and methodological foundations and practical recommendations for the use of software agent software for the formation of an effective information resources management system at corporate enterprises. Modern enterprises are complex dynamically systems, that developing in time, implement production and management functions, include a large number of elements, have a multi-level structure, a large number of external and internal information nodes. This determines the importance of an integrated approach to automating information processes in an enterprise. Enterprise Resource Management technology is one of the most important components of a strategy aimed at ensuring the management of information infrastructure in the face of increased load and increase the number of components of the system. Presently the problem of automation of management information-calculating resources goes out on the first plan, because in the modern terms of manage hand control is difficult enough and labour intensive. Modern enterprises are complex dynamically developing systems in time, include a large number of elements, implement production and management functions. Accordingly, they have a multi-level structure, a large number of external and internal information nodes. This determines the importance of an integrated approach to automating information processes in an enterprise. Enterprise Resource Management technology is one of the most important components of a strategy aimed at ensuring the management of information infrastructure in the face of increased load and increase the number of components of the system. At the present time, the problem of automation of information and computer resources management is coming to the fore, because in modern conditions of management, manual management of information resources is rather complex and time-consuming. Modern methods and facilities for managing information resources include various ways of structuring information, managing work flows and system management. New direction in the development of modern intellectual information technology allows you to move to a more intellectual level of user interaction with software and hardware associated with the use of standalone software agents. For the correct and efficient application of the technology of software agents, it is necessary to study the general principles and mechanisms of their interaction with the distributed information system. This involves the development of a formal description of program agents as a complex and autonomous system. The main tasks that can be solved with the help of software agents are: monitoring information resources, protecting the data of information resources of corporate information systems, managing flows of interrelated tasks of the user based on autonomous scenarios, managing the network resources of distributed computing systems, searching and analysis of data in networks.

Keywords: autonomous agents, information resources, corporate information systems, program agent, distributed information systems.

Вступ. Управління сучасним підприємством є складним комплексним завданням, що вимагає організації взаємодії різного роду ресурсів підприємства. До таких ресурсів відносяться і інформаційні системи, що забезпечують автоматизацію бізнес-процесів підприємства. Організація ефективної системи експлуатації ІТ-інфраструктури є одним з аспектів забезпечення заданого рівня якості ІТ-підприємства.

Основними складовими в побудові системи управління ІТ-ресурсами підприємства є передова методологія організації управління процесами експлуатації ІТ, програмні засоби, що дозволяють автоматизувати процеси управління, передова методологія розробки й впровадження інформаційної системи.

Питанням дослідження теоретичних і практичних аспектів управління інформаційними ресурсами корпоративних підприємств присвячено публікації таких вчених, як Буряк В.В., Василик М.А., Годин В.В., Корнєєв І.К., Літнарівч Р.М., Мартинюк П.М., Пономаренко В.С., Павленко Л.А., Сіміонов Ю.Ф., Татарчук М.І., Гушко С.В., Шквір В.Д. та інші. Однак, в умовах розвитку сучасного інформаційного простору дослідження організаційних і технічних аспектів сучасної української інформаційно-комунікаційної сфери лишаються досить актуальними.

Постановка задачі. Корпоративна інформаційна система (КІС) – це масштабована система, призначена для комплексної автоматизації усіх видів господарської діяльності великих і середніх підприємств, у тому числі корпорацій, що складаються з групи компаній, що вимагають єдиного управління.

КІС об'єднує систему управління персоналом, матеріальними, фінансовими та іншими ресурсами підприємства, персонал підприємства та передові інформаційні технології. Сучасні КІС за своєю природою завжди є розподіленими (багатомашинними) системами [1].

Якісно нові можливості для інформаційного забезпечення управління стали з'являтися з вирішенням завдань автоматизації передачі інформації і впровадженням КІС і технологій [8]. Для цих цілей застосовуються:

- електронна пошта та Web-технології (в тому числі Інтранет і корпоративні портали);
- корпоративні системи документообігу (системи електронного документообігу);
- корпоративні системи зберігання і пошуку документів і фактографічної інформації;
- системи управління потоками робіт (автоматизація обробки інформації та маршрутів руху документів щодо конкретних бізнес-процесів);
- системи спільної (групової) роботи над проектами документів;
- інформаційно-довідкові системи;
- системи управління ресурсами підприємства (ERP-системи);
- системи управління взаємовідносинами з клієнтами (CRM-системи);
- спеціалізовані системи (наприклад, банківські системи, страхування, дистанційне навчання і атестація персоналу і ін.), комплексні ІТ-технології.

Сучасні підприємства є складними динамічними системами, що розвиваються в часі, включають велику кількість елементів, реалізують виробничі та управлінські функції. Відповідно вони мають багаторівневу структуру, велику кількість зовнішніх та внутрішніх інформаційних зав'язків. Саме тому зростає важливість комплексного підходу до автоматизації інформаційних процесів на підприємствах. Ефективність автоматизації в першу чергу залежить від того, наскільки широко вона охоплює комплекси розрахунків, проведених в управлінні. Тому останнім часом, стала настільки популярною ідея побудови корпоративних інформаційних систем стосовно не тільки великих, територіально-розподілених корпорацій, але і будь-яких підприємств, незалежно від їх масштабу і форми власності. Сучасне підприємство, маючи на даний час одну мережу з локальним сервером і десятком комп'ютерів, в майбутньому може розширитися і представляти із себе саморегулюючу систему, здатну гнучко і оперативно перебудовувати принципи свого функціонування, маючи в своєму активі інтеграцію великого числа програмних продуктів [4].

Мета дослідження. Основним завданням статті є створення теоретико-методологічних засад та практичних рекомендацій з метою формування ефективної системи управління інформаційними ресурсами на підприємствах.

Виклад основного матеріалу дослідження. В сучасних умовах у практиці управління інформаційні ресурси (ІР) підприємства розглядаються як окрема економічна категорія. ІР – весь обсяг знань, незалежний від їх створювачів, зафіксований на матеріальних носіях і призначений для загального використання. Корпоративне підприємство, як і будь-яка складна система, використовує і розпоряджається у своїй діяльності обмеженою кількістю ресурсів, які можна розділити на такі види: трудові, матеріальні, інформаційні, природні та економічні [7].

Технологія управління ресурсами підприємства є однією з найважливіших складових стратегії, спрямованої на забезпечення керованості інформаційною інфраструктурою в умовах зростання навантаження і збільшення числа компонентів системи. Саме тому в даний час на перший план виходить проблема автоматизації управління інформаційно-обчислювальними ресурсами, тому що в сучасних умовах господарювання ручне управління ІР є досить складним і трудомістким.

Головною особливістю КІС є неоднорідність ІР, що проявляється в різноманітті середовищ представлення ресурсів, різній ступені структурованості даних, різноманітних засобах формалізованого представлення, відмінності використовуваних програмних систем, інтерпретації вмісту даних тощо [6]. Тому найважливішим із завдань управління ІР в КІС є процес їх інтеграції, що охоплює великий комплекс напрямків [8], в тому числі побудова інтегрованих моделей даних, створення архітектури систем інтеграції, створення методів відображення моделей даних, розробка мов опису онтологій, інтеграція схем розподілених баз даних, розробка методів злиття онтологій тощо.

Технологічною базою реальних інтеграційних проектів в КІВ є такі актуальні напрямки розвитку розподілених систем, як застосування систем з багаторівневою архітектурою, продуктів класу middleware, технологій Grid для побудови системи управління розподіленими обчислювальними ресурсами, об'єктно-орієнтованих засобів розробки розподілених додатків в стандарті CORBA, побудова розподілених систем на базі технології Enterprise Java Beans, активне використання архітектури Internet/Intranet і Java-технологій [5]. Таким чином, для ефективного управління інформаційними ресурсами КІС повинна володіти інтегрованими програмними продуктами, засобами автоматизованої підготовки складних аналітичних звітів і візуалізації даних, надійною інформацією про характер використання ІР, вичерпної поточною інформацією про стан всіх компонентів КІС [7, 8].

Новий напрям розвитку сучасних інтелектуальних інформаційних технологій, що дає змогу перейти на більш інтелектуальний рівень взаємодії користувача з програмним і апаратним забезпеченням, пов'язаний з використанням автономних програмних агентів (ПА). ПА – це інтерактивні автономні програмні системи, здатні до співпраці з користувачем для вирішення визначених задач, сприяють підвищенню ефективності праці та дають можливість користувачам доручити системі виконання складних завдань. Цей напрям є актуальним і перспективним на сучасному етапі розвитку розподілених обчислювальних систем. ПА – автономна фізична або віртуальна обчислювальна одиниця (комп'ютерна система), що базується на власних

ресурсах – знаннях та вміннях, засобах сприйняття середовища та впливу на це середовище, а також моделі середовища, заснованій на знаннях про нього. Найчастіше ПА використовуються для здійснення таких операцій як пошук інформації, обробка даних, виконання мобільних обчислень, моніторинг стану системи, доступ до IP [5].

Можна виділити два основні види ПА, залежно від їх призначення та властивостей, програмний агент – автономний процес, здатний реагувати на середовище виконання і викликати в ньому зміни та автономний агент – система, що знаходиться усередині середовища, є його частиною, впливає на оточення для виконання власної програми дій [3]. В роботі [2] автор дає наступне визначення: «автономний сценарій – це додаток, що функціонує в системі у фоновому режимі і виконує завдання задане користувачем, формуючи адекватну реакцію у вигляді неподільної дії або послідовності дій у відповідь на те, що відбувається в обчислювальній системі». Відповідно технологія автономних сценаріїв – принцип управління IP розподіленого обчислювального середовища КІС на основі автономних ПА. Інтегрована система управління IP – програмна система управління, заснована на технології ПА, що включає систему управління ПА, яка здійснює проектування, розробку, впровадження, контроль та аналіз роботи системи, заснованої на технології автономних ПА. Для коректного та ефективного застосування технології ПА необхідні дослідження загальних принципів і механізмів взаємодії ПА із середовищем, в якому вони функціонують, тобто з розподіленою інформаційною системою. Це передбачає розробку формалізованого опису системи управління автономними ПА, як складної, автономної і самоорганізованої системи.

Інформаційно-обчислювальна середовище є неодмінною складовою будь-якої КІС і утворює інформаційний простір підприємства, який у загальному вигляді можна представити у вигляді множини:

$$P = \langle O, S, G \rangle, \tag{1}$$

де O – об'єкти інформаційного простору, S – відносини між об'єктами, G – операції маніпулювання об'єктами в інформаційному просторі.

В якості об'єктів $O = \{O_n | n = \overline{1, N_1}\}$ $O = \{O_n | n = \overline{1, N_1}\}$ інформаційного простору виступають IP розподіленої обчислювальної системи КІС.

Відносини між об'єктами інформаційного простору $S = \{S_n | n = \overline{1, N_2}\}$ $S = \{S_n | n = \overline{1, N_2}\}$ визначають конфігурацію обчислювального середовища P , орієнтованого або на конкретного користувача або групу користувачів КІС ($Q = \{Q_n | n = \overline{1, N_3}\}$ – множина користувачів).

Реалізуючи поставлені завдання, користувач Q_n в довільні моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_m, t_1, t_2, \dots, t_m$ виконує в інформаційно-обчислювальному середовищі P певні дії $Z_{ni}(t)$ $Z_{ni}(t)$ заданої множини задач Z . Отже користувач виконує операції $G = \{G_n | n = \overline{1, N_4}\}$ $G = \{G_n | n = \overline{1, N_4}\}$ над об'єктами інформаційного простору на основі деякого формалізованого плану дій множини задач Z ($Z_{ni} \in Z, (i = \overline{1, m})$).

Залежно від подій, що відбуваються в системі, і результатів виконання користувачем попередніх дій алгоритм виконуваних завдань може змінюватись.

Модель взаємодії користувача з інформаційним простором P можна представити у вигляді:

$$y_n(t) = e_n(x_n(t)), n = \overline{1, N_3} \quad y_n(t) = e_n(x_n(t)), n = \overline{1, N_3} \tag{2}$$

де $x_n(t)$ $x_n(t)$ – вхідний вплив на інформаційний простір P з боку користувача Q_n , $y_n(t)$ – реакція системи.

Схема взаємодії «користувач – інформаційний простір» представлена на рис. 1.

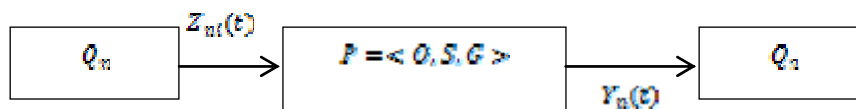


Рис. 1. Схема взаємодії користувача з інформаційним простором

У загальному випадку $x_n(t)$ – елементарна задача, яку користувач Q_n вирішує за допомогою інформаційної системи в інформаційному просторі $P = \langle O, S, G \rangle$.

Розглянемо випадок потоку завдань, коли для вирішення кожного завдання $Z_{ni}(t)$ $Z_{ni}(t)$ залучається ПА $m_k \in M$ $m_k \in M$, (де M – множина ПА, які реалізують множину задач Z). Одночасно повинні виконуватись умови узгодження завдань ПА. Такий потік завдань $Z_{n1}(t_1), Z_{n2}(t_2), \dots, Z_{nk}(t_k), n = \overline{1, N_3}, k = \overline{1, m}$ $Z_{n1}(t_1), Z_{n2}(t_2), \dots, Z_{nk}(t_k), n = \overline{1, N_3}$ може бути представлений як послідовність виконання завдань програмними агентами m_1, m_2, \dots, m_k m_1, m_2, \dots, m_k .

Перш за все, автономний сценарій характеризує поведінку ПА, яка визначається метою виконання

завдання. У статичних середовищах сценарій роботи ПА є цілеспрямованим планом роботи для досягнення мети. Така модель програмування підходить для вирішення безлічі статистичних завдань. У динамічних середовищах сценарій роботи ПА, які постійно виконують неструктуровані завдання, повинні намагатися систематично досягати своїх цілей, використовуючи більш складні алгоритми, самостійно реагувати на події, що буде виправдовувати мету, що стоїть перед системою ПА в цілому. Якщо ПА не досягає поставленої мети, в системі повинна існувати можливість автоматичного переходу до іншого варіанту сценарію роботи ПА на зміну поточному. При впровадженні в КІС великої кількості ПА, що автоматизують визначені завдання управління інформаційними ресурсами, їх супровід значно ускладнюється, що в результаті може звести нанівець весь ефект від автоматизації.

Висновки. Основні завдання, які можна вирішувати за допомогою ПА: моніторинг інформаційних ресурсів обчислювальних систем, захист даних і аудит ІР, управління потоками взаємопов'язаних завдань користувача на основі автономних сценаріїв, управління мережевими ресурсами розподілених обчислювальних систем, пошук і аналіз даних в мережах Intranet/Internet. Одним із засобів ефективного функціонування системи управління інформаційними ресурсами є раціональна організація спільної роботи ПА. Для цього слід визначити складові системи і способи їх взаємодії, а також функції сценаріїв роботи ПА, які перебувають на різних рівнях управління. Необхідно забезпечити можливість системі ПА постійно розвиватися і вдосконалюватися, розширювати коло вирішуваних ними завдань за рахунок проектування та розробки нових типів сценаріїв, забезпечувати їх інтеграцію і супровід в рамках інформаційно-обчислювального простору підприємства, забезпечивши їх відповідним інструментарієм.

Література

1. Євдокимов В. В. Корпоративні інформаційні системи: проблеми впровадження та аналіз ефективності / В. В. Євдокимов // Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки. – 2009. – Вип. 16(1). – С. 227–235.
2. Козырь О.Ф. Управление информационными ресурсами посредством автономных сценариев [Электронный ресурс] / О.Ф. Козырь, В.А. Филатов. – Режим доступа : <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-3-659-92165-0>. – (Дата звернення: 10.07.2018).
3. Коновалов О. Ю. Агентні технології у розподілених обчислювальних системах / О. Ю. Коновалов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – № 2. – С. 63–68.
4. Литвинов О.А. Розподілена обробка інформації : монографія / О.А. Литвинов, В.С. Хандецький. – Д. : ТОВ «Баланс-Клуб», 2013. – 314 с.
5. Огневий О.В. Методи організації інформації в інформаційно-аналітичних системах / О.В. Огневий, А.М. Огнева, Д.В. Зайцев, О.В. Банзак // Сучасна спеціальна техніка : науково-практичний журнал. – Київ. – 2016. – № 2(45). – С. 68–74.
6. Огнева А.М. Новітні інформаційні технології як важливий чинник ефективного керування корпоративним підприємством / А.М. Огнева // Управління економічними системами: концепції, стратегії та інновації розвитку : матеріали ІХ міжн. наук.-практ. конф. – Хмельницький, 2014. – С. 281–284.
7. Огнева А.М. Консолідація інформації як найважливіший чинник ефективного керування підприємством / А.М. Огнева // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 4. Т. 3(214). – С. 109–113.
8. Урікова О.М. Структура і система функціонування інформаційних ресурсів корпоративних підприємств / О.М. Урікова // Вісник Нац. Унів-ту «Львівська політехніка». – Львів. – 2012. – № 735. – С.229–235.

References

1. Yevdokymov V. V. Korporatyvni informatsiini systemy: problemy vprovadzhennia ta analiz efektyvnosti / V. V. Yevdokymov // Naukovi pratsi Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky. - 2009. - Vyp. 16(1). - S. 227-235.
2. Kozyr O.F. Upravlenie informatsionnymi resursami posredstvom avtonomnykh stsenariiev [Elektronnyi resurs] // O.F. Kozyr, V.A. Filatov.. Rezhim dostupu: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-3-659-92165-0>. (data zvernennya: 10.07.2018).
3. Konovalov O. Yu. Ahentni tekhnologii u rozpodilenykh obchysliuvalnykh systemakh / O. Yu. Konovalov // Naukovi zapysky Ukrainkoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku.- 2013. - № 2. - S. 63-68.
4. Lytvynov O.A. Rozpodilena obrobka informatsii: monohrafiia/ O.A. Lytvynov, V.S. Khandetskyi. - D.: TOV «Balans-Klub», 2013. - 314 s.
5. Ohnievii O.V., Ohneva A.M., Zaitsev D.V., Banzak O.V. Metody orhanizatsii informatsii v informatsiino-analitychnykh systemakh/ O.V. Ohnievii, A.M. Ohneva, D.V. Zaitsev, O.V. Banzak // Suchasna spetsialna tekhnika: Naukovo praktychnyi zhurnal. – Kyiv. - 2016. - Vyp.№2(45). - S.68-74.
6. Ohneva A.M. Novitni informatsiini tekhnologii yak vazhlyvyi chynnyk efektyvnoho keruvannia korporatyvnyim pidpriemstvom / A.M. Ohneva// Upravlinnia ekonomichnymy systemamy: kontseptsii, stratehii ta innovatsii rozvytku: materialy IKh mizhn. nauk.-prakt. konf. – Khmelnytskyi. - 2014. - S.281-284.
7. Ohneva A.M. Konsolidatsiia informatsii yak naivazhlyvishy chynnyk efektyvnoho keruvannia pidpriemstvom / A.M. Ohneva// Herald of Khmelnytskyi National University.- Khmelnytskyi.- 2014. - Volume T3(214).- S.109-113.
8. Urikova O.M. Struktura i sistema funktsionuvannia informatsiinykh resursiv korporatyvnykh pidpriemstv / O.M. Urikova // Visnyk Nats. Univ-tu «Lvivska politekhnika». – Lviv. - 2012. - №735. - S.229-235.

Рецензія / Peer review: 28/08/2018 Надрукована/ Printed: 21.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. О.А. Мясіщев

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПЛАВІВ ПОЛІМЕРІВ

Вперше в середовищі Delphi мовою Object Pascal розроблено програмне забезпечення для визначення основних реологічних характеристик розплавів полімерів та представлення в'язкісних властивостей неньютонівських рідин у графічному вигляді. Зсувову течію розплавів полімерів вивчали на капілярному віскозиметрі постійного тиску марки MB-2. Дослідження проводили на вихідному поліпропілені за модифікованою нанодобавкою. Розрахунок параметрів течії розплавів здійснювали з використанням загальноприйнятої методики для неньютонівських систем. Визначення матеріальних функцій для полімерних рідин в конкретних умовах їх течії за допомогою створеної програми значно спрощує та скорочує тривалість обробки результатів експериментальних досліджень. Встановлені реологічні характеристики дозволяють правильно вибрати технологічні параметри переробки модифікованих полімерів, в тому числі і у волокна та нитки, а також можуть бути використані при проектуванні нового обладнання для їх виробництва.

Ключові слова: програмне забезпечення, розплави полімерів, в'язкість, режим течії

V.G. REZANOVA, N.M. REZANOVA
Kyiv National University of Technology and Design

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR DETERMINATION OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF POLYMERIAL DISCHARGES

For the first time in the Delphi environment by Object Pascal the software to determine main rheological characteristics of polymer melts and the presentation of the viscosity properties of non-Newtonian fluids in graphical form was developed. The shear flow of polymer melts was studied on a capillary viscometer of constant pressure of the mark MB-2. The studies were carried out on the original polypropylene and modified with nano-additive. The calculation of the flow parameters of the melts was carried out using the conventional method for the non-Newtonian systems. Determination of material functions for polymeric fluids under specific conditions of their flow through the created program greatly simplifies and reduces the time of processing of the results of experimental research. The established rheological characteristics allow us to select correctly the technological parameters of the processing of modified polymers, including fibers and threads, and can also be used in the design of new equipment for their producing.

Keywords: software, polymer melt, viscosity, flow regime.

Вступ

Протягом тривалого часу полімерні матеріали використовуються в багатьох сферах життєдіяльності, проте в останні 20 років попит на них різко виріс та розширились галузі застосування від побутових товарів (тканин, текстилю, трикотажу, упаковки, біомедичних продуктів) до високотехнологічної продукції (аерокосмічної і військової техніки). Це зумовлено рядом їх переваг перед іншими матеріалами (термо- і корозійна стійкість, невелика вага в поєднанні з високими механічними характеристиками, низька собівартість), а також значний технологічний прорив у розробці методів надання нових унікальних властивостей полімерним виробам. Серед них найбільш ефективним є введення нанодобавок в розплав полімеру в процесі його переробки. Використання речовин в наностані дозволяє ефективно вирішувати проблеми підвищення міцності, пружності, надання негорючості, унікальних триботехнічних, електричних, магнітних, оптичних сорбційних, антимікробних властивостей синтетичним волокнам і ниткам та виробам на їх основі [1, 2]. Як нанонаповнювачі широко використовуються шаруваті силікати, одно- і багат шарові вуглецеві нанотрубки, наночастинки (НЧ) металів та їх оксидів, кремнезему, детонаційні наноалмази, біфункціональні добавки тощо [3]. Властивості нанонаповнених композитів визначаються рядом факторів – характеристиками полімерної матриці, розміром частинок нанодобавки, їх формою, орієнтацією та взаємним розміщенням. Значний вплив на реологічні показники має взаємодія між наповнювачем і полімером на молекулярному рівні, яка може приводити для підвищення або зниження в'язкості розплавів таких систем.

Постановка завдання

Особливістю переробки полімерів у виробі є необхідність їх переводу у в'язко-текучий стан з метою надання необхідної форми. Відомо, що в основі класичної гідромеханіки лежить модель в'язкої рідини Ньютона, згідно з якою напруга зсуву (τ) прямо пропорційна швидкості деформації ($\dot{\gamma}$): $\tau = \eta \dot{\gamma}$, де коефіцієнт пропорційності η називають в'язкістю. Для розплавів високомолекулярних сполук характерною є так звана аномалія в'язкості, тобто відхилення від вказаного закону Ньютона, яка пов'язана з внутрішньою структурою розплавів полімерів. Характер течії таких систем підпорядковується ступеневому закону:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

де n – ступінь відхилення від ньютонівської течії

З огляду на це, доцільним є вивчення реологічної поведінки вихідних та модифікованих розплавів полімерів з метою встановлення основних закономірностей їх течії як чинника, що впливає на технологічні параметри переробки. Серед різних властивостей полімерних систем у в'язко-текучому стані важливою в практичному відношенні є ефективна в'язкість. Для дослідження реологічних характеристик розплавів

полімерів використовують капілярні віскозиметри постійного тиску, оскільки в них течія відбувається за зсувним механізмом, як і у технологічному обладнанні для їх переробки [4]. Розрахунок параметрів течії розплавів полімерів та представлення одержаних результатів у графічному вигляді є достатньо трудомістким та потребує значних затрат часу [5].

Мета роботи – створення програмного забезпечення для обробки експериментальних даних щодо визначення величини ефективної в'язкості розплавів полімерів, характеру течії та графічного зображення результатів дослідження.

Результати досліджень

Програмне забезпечення розробляли в середовищі Delphi мовою Object Pascal [6, 7, 8]. Для проведення експериментальних досліджень використовували вихідний поліпропілен (ПП) та модифікований нанодобавкою срібло/оксид алюмінію (Ag/Al_2O_3) в кількості (0,1÷3,0) мас. %. Реологічні характеристики досліджуваних розплавів полімерних систем вивчали за допомогою капілярного віскозиметра марки МВ-2. Течія розплаву через капіляр відбувається за рахунок перепаду тисків між його кінцями:

$$\Delta P = \frac{P}{F}, \quad (2)$$

де P – маса поршня, рамки і навантажувальних дисків та зусилля пружини індикатора;
 F – площа поршня.

Обробку експериментальних результатів здійснювали з використанням загальноприйнятої методики для неньютонівських систем [5]. Напругу зсуву на стінці капіляру визначали за рівнянням:

$$\tau = \frac{\Delta P \cdot r}{2L},$$

$$\tau = \frac{4r \cdot P}{\pi \cdot d_n^2 \cdot 2L} = K_1 \cdot P, \quad (3)$$

де r , L – радіус і довжина капіляру відповідно;

d_n – діаметр поршня;

K_1 – постійна величина для даного капіляру, яка залежить від його діаметра і довжини.

Для спрощення розрахунків рівняння (3) переводили в логарифмічну систему:

$$\lg \tau = \lg K_1 + \lg P \quad (4)$$

Швидкість зсуву залежить від об'ємної швидкості витікання розплаву із капіляру (Q) і розраховується за формулою:

$$D = \frac{Q}{\pi r^3}, \quad (5)$$

$$Q = \frac{S \cdot \pi \cdot d_n^2}{4t}, \quad (6)$$

де S – переміщення поршня під дією перепаду тиску, заміряне по індикатору;

t – час, за який здійснюється переміщення поршня.

В логарифмічній системі рівняння (6) матиме вигляд:

$$\lg D = \lg K_2 + \lg \left(\frac{S}{t} \right), \quad (7)$$

де K_2 – стала величина для даного капіляру

Величина швидкості зсуву, визначена за рівнянням (7), є орієнтовною, оскільки не враховує вхідних явищ, що мають місце при переході із широкого резервуару віскозиметра у вузький капіляр, тому на вході в нього за течії полімерного розплаву виникає перепад тиску, який значно більший, ніж для неньютонівських рідин [4]. Втрати тиску на вході в капіляр обумовлені перепадом тиску, що виникає в результаті східної течії, перебудовою профілю швидкостей потоку та здатністю розплаву полімеру накопичувати пружну енергію. Вказані втрати враховуються поправкою Вайсенберга-Рабіновича [5]. Для цього за даними рівняння (7) будується допоміжна крива течії, що зв'язує напругу із градієнтом швидкості зсуву на стінці капіляру. З неї розраховують режим течії як тангенс кута нахилу дотичної в даній точці кривої:

$$n = \frac{\Delta \lg D}{\Delta \lg \tau} \quad (8)$$

Програмне зображення допоміжної кривої течії наведено на рис. 1.

Дана крива описує сукупність сталих режимів течії з різними швидкостями і напругами зсуву. Типова крива течії для неньютонівської рідини має S – подібну форму. За достатньо низьких та високих значень швидкостей і напруг зсуву ці величини пов'язані між собою прямопропорційною залежністю. Середня ділянка кривої течії неньютонівської рідини називається «структурною», кожна точка якої відповідає стану динамічної рівноваги між процесами руйнування і відновлення структури розплаву.

Для одержання істинної кривої течії та розрахунку величини в'язкості допоміжну криву течії умовно розділяють на дві частини: одна відповідає найбільшій неньютонівській в'язкості, а друга – «структурній» ділянці, а потім для них розраховують середнє значення показника n_{cp} . З урахуванням

поправки Вайсенберга-Рабіновича швидкість зсуву визначають за формулою:

$$\gamma = \frac{(n_{cp.} + 3) \cdot Q}{\pi \cdot r^3} \quad \text{або} \quad \gamma = (n_{cp.} + 3) \cdot D \quad (9)$$

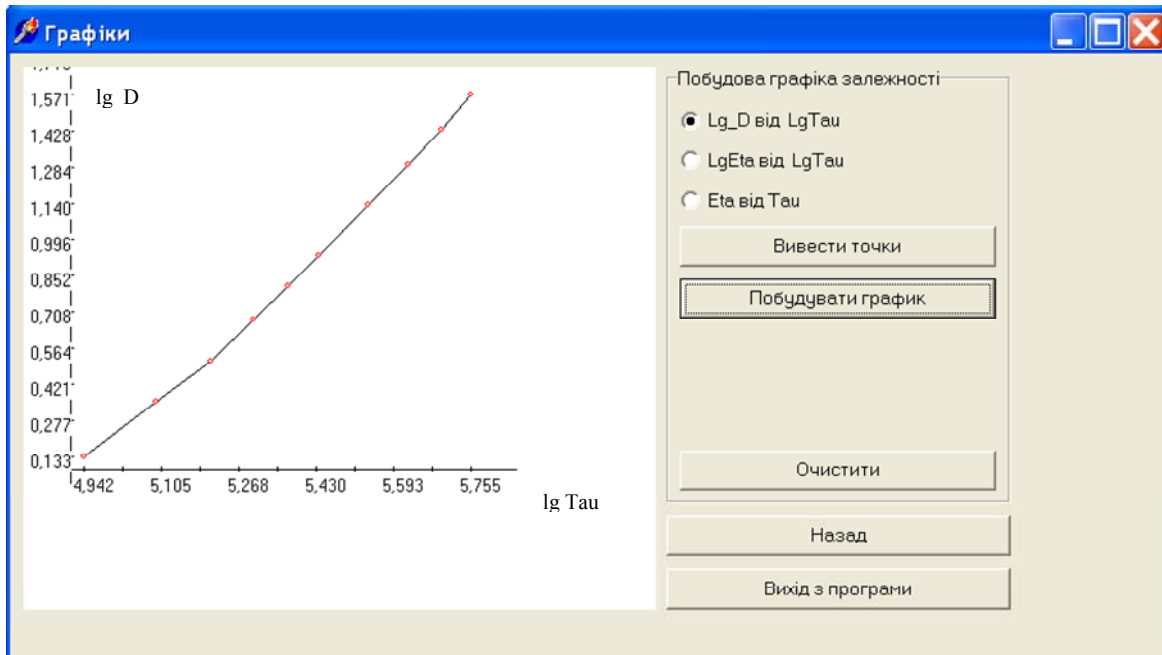


Рис. 1. Програмне зображення допоміжної кривої течії

В логарифмічній системі рівняння (9) матиме вигляд:

$$\lg \gamma = \lg(n + 3) + \lg D \quad (10)$$

Величина в'язкості розраховується за рівнянням:

$$\lg \eta = \lg \tau - \lg D \quad (11)$$

Результати обробки експериментальних даних щодо течії розплаву поліпропілену, модифікованого 1,0 мас. % $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$, за допомогою створеної програми представлені на рис. 2.

N	tcр	S	LgTau	S/tcр	Lg_D	n	ncp	LgGamma	LgEta	Eta
1	5,1	50	5,7553	0,0098039	1,5714	2,2770		2,2673	3,4880	3076,2
2	5,6	40	5,6949	0,0071429	1,4339	1,9660		2,1298	3,5651	3674,0
3	5,8	30	5,6236	0,0051724	1,2937	1,9333	1,96461	1,9896	3,6340	4305,5
4	5,6	20	5,5404	0,0035714	1,1328	1,9207		1,8287	3,7117	5148,4
5	6,7	15	5,4348	0,0022388	0,9300	1,8915		1,6259	3,8089	6440,2
6	5,9	10	5,3709	0,0016949	0,8091	1,7992		1,5050	3,8659	7342,9
7	4,0	5	5,2974	0,0012500	0,6769	1,8758		1,3322	3,9652	9230,7
8	4,7	4	5,2084	0,0008511	0,5100	1,4010	1,52121	1,1652	4,0432	11045,4
9	5,1	3	5,0939	0,0005882	0,3496	1,4295		1,0048	4,0891	12277,0
10	5,6	2	4,9423	0,0003571	0,1328	1,3786		0,7881	4,1542	14262,7

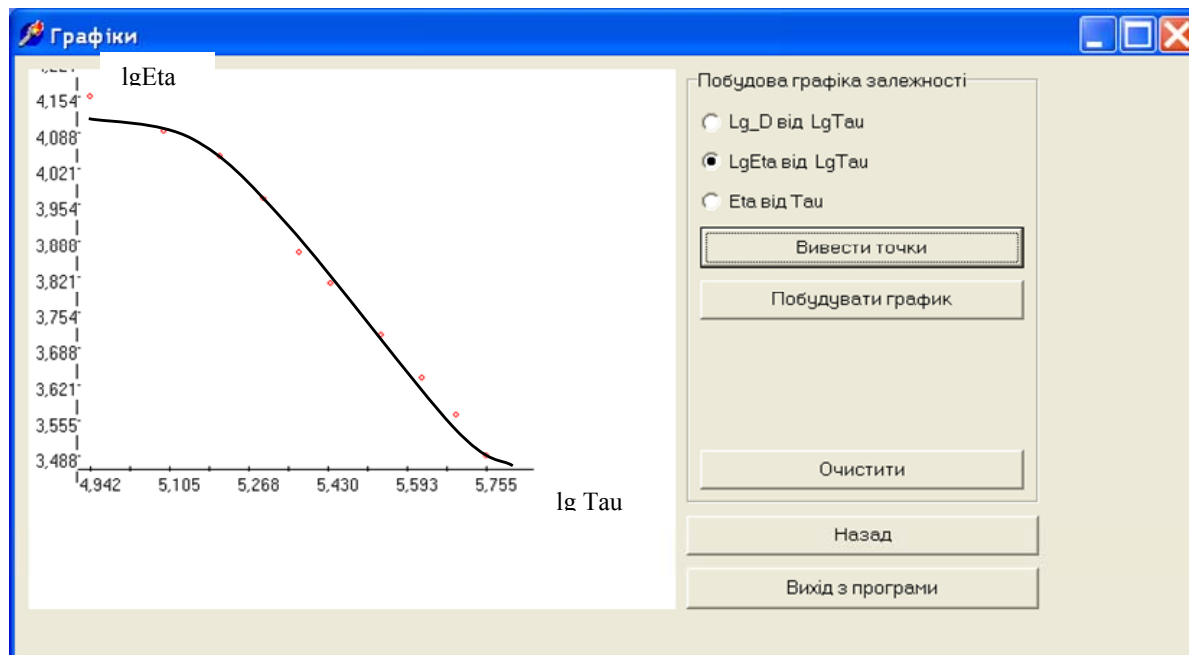
Рис. 2. Матеріальні функції процесу течії розплаву ПП+1,0 мас. % $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$, розраховані за допомогою створеної програми

Розроблене програмне забезпечення дозволяє представити у графічному вигляді істинну криву течії $\lg \gamma = f(\lg \tau)$, а також залежності η від напруги і швидкості зсуву. На рис. 3 наведена функція $\lg \eta = f(\lg \tau)$ для розплаву поліпропілену, наповненого 1,0 мас. % $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Вплив вмісту нанодобавки срібло/оксид алюмінію на параметри течії розплаву поліпропілену, розраховані за допомогою розробленої програми, наведені в таблиці.

Реологічні властивості розплавів вихідного та модифікованого поліпропілену

Параметри течії	Концентрація нанодобавки, мас. %				
	0	0,1	0,5	1,0	3,0
в'язкість, Па*с	260	290	300	310	350
режим течії	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9

Рис. 3. Програмне зображення залежності $\lg \eta = f(\lg \tau)$

Одержані результати свідчать, що з введенням нанодобавки в'язкість розплавів поліпропілену закономірно зростає, тобто проявляється ефект наповнення твердою речовиною. Характер течії вихідного та модифікованих розплавів поліпропілену підпорядковується ступеневому закону, а ступінь відхилення від ньютонівської течії дещо зменшується з ростом вмісту наповнювача. При цьому поліпропілен, модифікований нанодобавкою $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$, стабільно переробляється на існуючому технологічному обладнанні у волокна і нитки. Отримані нанопоповнені нитки мають покращені механічні властивості та проявляють антимікробну дію.

Висновки

Розроблено програмне забезпечення в середовищі Delphi мовою Object Pascal для обробки експериментальних результатів дослідження реологічних властивостей розплавів полімерів методом капілярної віскозиметрії. Показано, що створена програма дозволяє розрахувати в'язкість та режим течії розплавів, а також представити результати у вигляді графічних зображень кривої течії і залежності в'язкості від напруги та швидкості зсуву. Одержані дані, визначені за різних температур і складу полімерних систем, дають важливу інформацію щодо морфології та структурних перетворень розплавів полімерів. Розроблена програма дозволяє суттєво скоротити термін і спростити процес обробки експериментальних результатів, а також вибрати технологічні параметри переробки в залежності від реологічних характеристик розплавів.

Література

1. Геллер В.Э. О возможности получения нанокompозитных текстильных нитей / В.Э. Геллер // Химические волокна. – 2013. – № 1. – С. 3–9.
2. Rezanova N.M. The influence of nano-additives on the formation of matrix-fibrillar structure in the polymer mixture melts and on the properties of complex threads / N.M. Rezanova, V.G. Rezanova, V.P. Plavan, O.O. Viltaniuk // Vlákna a textil (Bratislava, Slovak Republic). – 2017. – № 2. – P. 37–42.
3. Герасин В.А. Новые подходы к созданию гибридных полимерных нанокompозитов: от конструкционных материалов к высокотехнологичным применениям / В.А. Герасин, Е.М. Антипов, В.В. Карбушев, В.Г. Куличихин, Р.В. Тальрозе, Я.В. Кудравцев // Успехи химии. – 2013. – Т. 82, № 4. – С. 303–332.
4. Хан Ч.Д. Реология в процессах переработки полимеров / Хан Ч.Д. ; перевод с англ. ; под ред. Г.В. Виноградова, М.Л. Фридмана. – М. : Химия, 1979. – 368 с.
5. Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров. Методы измерения / А.Я. Малкин, А.Е. Чалых. – М. : Химия, 1985. – 257 с.

6. Фленов М. Библия Delphi / Фленов М. – 3-е изд. – СПб : БХВ-Петербург, 2012. – 688 с.
7. Осипов Д. Л. Delphi. Программирование для Windows, OS X, iOS и Android / Д. Л. Осипов. – СПб : БХВ-Петербург, 2014. – 464 с.
8. Пестриков В. Delphi на примерах / Пестриков В., Маслобоев А. – СПб : БХВ-Петербург, 2012. – 496 с.

References

1. Geller V.E. O vozmozhnosti polucheniya nanokompozitnykh tekstilnykh nitey [On the possibility of obtaining nanocomposite textile threads] // Khimicheskie volokna №1, 2013. – s. 3-9. [in Russian]
2. Rezanova N.M., Rezanova V.G., Plavan V.P., Viltaniuk O.O. The influence of nano-additives on the formation of matrix-fibrillar structure in the polymer mixture melts and on the properties of complex threads // Vlákna a textil (Bratislava, Slovak Republic) - №2, 2017. - p. 37-42
3. Gerasin V.A., Antipov E.M., Kulichikhin V.G., Talroze R.V., Kudrvtsev Y.V. Novye podhody k sozdaniyu gibridnykh polimernykh nanokompozitov ot konstruktsionnykh materialov k vysokotekhnologichnym primeneniyam [New approaches to creating hybrid polymer nanocomposites: from structural materials to high-tech applications] // Uspehi himii. – 2013. T.82, №4. – s. 303-332. [in Russian]
4. Han C.D. Reologiya v protsessah pererabotki polimerov [Rheology in the Processes of Polymer Processing] / perevod s angl. Pod red. G.V. Vinogradova, M.L. Fridmana. M.: Himia. – 1979. – 368 s. [in Russian]
5. Malkin A.Y., Chalikh A.E. Diffusia i v'язkost polimerov. Metody izmereniya. [Diffusion and viscosity of polymers. Methods of measurement] // M.: Himia. – 1979. – 368 s. [in Russian]
6. Flenov M. Biblia Delphi (3-e izdanie) [The Delphi Bible (3rd edition)] // SPb.: BHV-Peterburg, 2012 – 688 s. [in Russian]
7. Osipov D.L. Delphi. Programmirovaniye dlia Windows, OS X, iOS i Android [Programming for Windows, OS X, iOS and Android] // SPb.: BHV-Peterburg, - 2014. – 464 s. [in Russian]
8. Pestrikov V., Masloboev A. Delphi na primerakh [Delphi on examples] // SPb.: BHV-Peterburg, 2012 – 496 s. [in Russian]

Рецензія/Peer review : 11.6.2018 р.

Надрукована/Printed : 21.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Чупринка В.І.

РОЗРОБКА МНОЖИНИ ТЕГІВ ДЛЯ ФОРМАЛЬНОГО ОПИСУ ЕЛЕМЕНТІВ МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ

В статті визначено необхідність розробки набору тегів для формального опису елементів моделей формування тестових завдань. Теги призначені для кодування маски ідентифікації елементів контенту та маски формування тестів у моделях формування тестових завдань. Моделі формування тестових завдань складаються з маски ідентифікації елементів контенту, алгоритму перетворення контенту та маски формування тестів у моделях формування тестових завдань; її призначені для визначення механізмів автоматизованого формування тестових завдань за введеним контентом. Відповідно до складових моделей формування тестових завдань розроблено теги двох видів: теги для ідентифікації елементів контенту та теги для формування тестів. Теги для ідентифікації елементів контенту використовуються в масках ідентифікації. З використанням розроблених тегів для ідентифікації елементів контенту було розроблено наступні види масок ідентифікації елементів контенту: базова, другорядна, реверсивна, комплексна. Теги для формування тестів використовуються в масках формування тестових завдань. За умови достатньої відповідності семантичним та структурним вимогам і коректного співвідношення між обсягом контенту навчального матеріалу та параметрів генерації набору тестових завдань, одержується репрезентативний тест, що може бути використаний як безпосередньо для тестування, так і як сировина для подальшої роботи розробника тестів. Розроблений набір тегів дозволяє проводити зручне й ефективно створення нових чи редагування існуючих моделей формування тестових завдань. Також розроблений набір тегів дозволяє компактно зберігання розроблених моделей для подальшого використання. Створювані за допомогою розробленого набору тегів моделі призначені для використання в рамках інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань, яка забезпечує максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу під час реалізації відповідних прикладних програмних систем.

Ключові слова: тестування, тести, тестові завдання, Moodle, навчальні матеріали, ключові терміни.

O. MAZURETS
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF THE SET OF TAGS FOR A FORMAL DESCRIPTION OF MODELS ELEMENTS OF AUTOMATED CREATION OF TEST TASKS

The article defines the need to develop the set of tags for the formal description of the elements of the models for the formation of test tasks. The above tags are code elements, or variables, that have different meanings during the operation of the algorithm, which may have some value or not have any value. Tags are intended for encoding the elements of content mask and test setup masks in test task generation models. Models of test tasks formation consist of a mask for identifying content elements, a content conversion algorithm, and a test set mask in test design modeling models. These models of test tasks formation are intended to determine the mechanisms of automated formation of test tasks for the entered content. In accordance with the components of the test task generation models, two types of tags have been developed: tags for identifying content elements and tags for the formation of tests. Tags for identifying content elements are used in identifying masks. Using the developed tags for identifying content elements, the following types of content identification masks were developed: basic, secondary, reversible, complex. Tags for forming tests are used in masks for forming test tasks. It has been established that in the widespread use of specialized virtual learning environments, the potential quality of checking the level of educational services received is directly determined by the quality of the tests. The information technology of the automated formation of test tasks is considered, providing the maximum uniform and wide coverage of the set of test tasks of the semantics of the educational material, as well as the possibility of transfer of sets of test tasks to the Moodle environment. The resulting test can be used directly for testing or as a raw material for the further development and improvements. Using the described approach, which based on the proposed set of tags, the information technology of the automated formation of test tasks allows to provide as uniformly and broadly as possible a set of test tasks of the semantics of the training material, and then transfer sets of test tasks to the Moodle environment. Provided that the semantic and structural requirements and the correct relationship between the contents of the training material and the parameters of the generation of the set of test tasks are adequately matched, a representative test can be obtained, which can be used both directly for testing and as a raw material for the further work of the developer of tests. The developed set of tags allows to make convenient and effective creation of new or editing of existing models for the formation of test tasks. Also, the set of tags allows to compactly store developed models for future use. Created with the help of the developed set of tag models are intended for use in the information technology of automated formation of test tasks, which ensures as uniformly and broadly as possible a set of test tasks of the semantics of a educational material and for implementation of the application software systems.

Keywords: testing, tests, test tasks, Moodle, educational materials, key terms.

Постановка проблеми в загальному вигляді

Важливу роль в розв'язанні проблеми ефективного контролю рівня знань, що постає з розвитком нових технологій і підвищенням ступеня інформатизації суспільства й освіти, відіграють комп'ютерні засоби перевірки знань [1]. Застосування інформаційних технологій в навчанні дозволяє індивідуалізувати процес навчання, забезпечити оперативний самоконтроль і контроль з діагностикою помилок і оберненим зв'язком.

Одним із основних способів контролю знань в навчальних інформаційних системах залишається комп'ютерне тестування, яке, крім контрольної функції застосовується для навчання, тренінгу, розвитку когнітивних здібностей. Інформаційні технології дають можливість суттєво зменшити трудові затрати на створення тестових завдань з можливістю їх постійного оновлення, що формує актуальний напрямок

наукових досліджень.

Тест включає в себе набір тестових завдань різної складності, що робить результат тестування більш об'єктивним. При якісному конструюванні тесту можна забезпечити відповідний рівень дискримінативності. Розробка набору тестових завдань для перевірки якості засвоєння певної одиниці навчального матеріалу вимагає не тільки семантично якісних тестових завдань, збалансованих за рівним складності та типом, а й повноцінного та рівномірного покриття навчального матеріалу набором тестових завдань [2].

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 численні праці українських і закордонних авторів: Аванесова В. С., Титенка С. В., Пасічника В. В., Снитюка В. Е., Тонкононого В. М., Башмакова І. А., Клайна П., Гагаріна О. О., Schwarz, Weber. Більшість з них здійснювали дослідження в сфері проведення тестувань, наповнення бази тестових завдань за допомогою засобів підтримки ручного створення тестових завдань, безпеки процесу тестування і відтворення результатів.

Проблеми автоматизації процесу тестування і обробки його результатів ґрунтовно досліджені в літературі. Однак, задачі автоматизації формування банку тестових завдань досліджені в недостатній мірі [3]. Поряд із цим новітні інформаційні технології дають можливість суттєво зменшити трудові затрати на створення самих тестових завдань з можливістю їх постійного оновлення, що формує актуальний напрямок наукових досліджень.

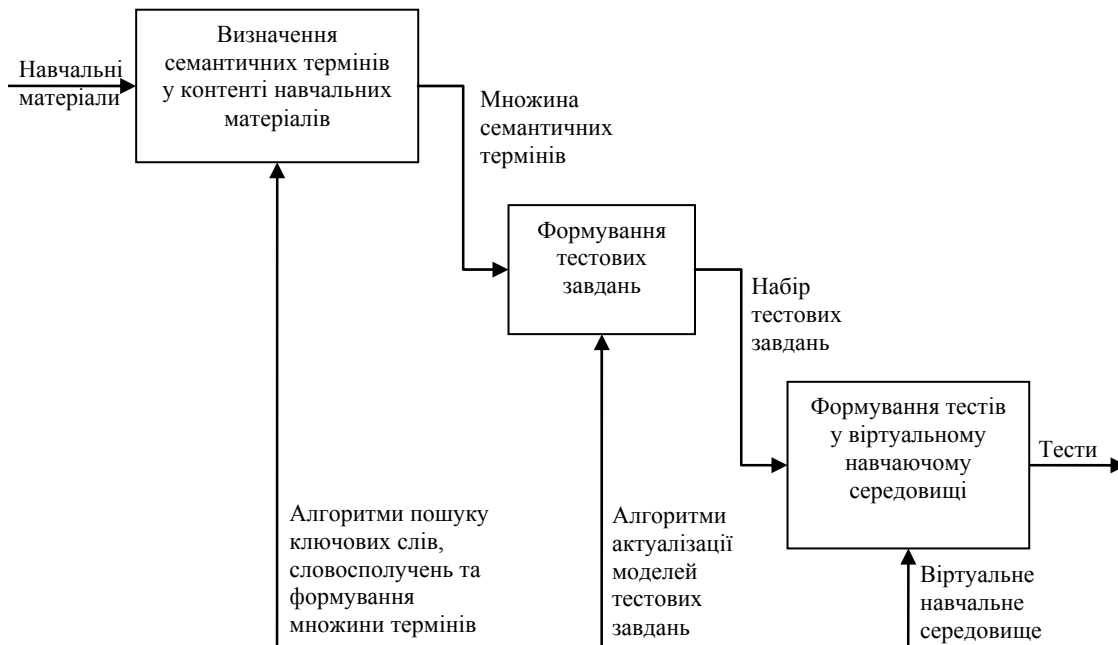


Рис. 1. Діаграма етапів автоматизованого формування тестових завдань

В попередніх роботах [4, 5] було описано розроблену інформаційну технологію автоматизованого формування тестових завдань на основі контенту навчальних матеріалів. Дана інформаційна технологія, функціональну діаграму послідовності дій при автоматизованому формуванні тестових завдань якої подано на рисунку 1, дозволяє на основі вхідних даних у вигляді контенту файлу формату .docx навчальних матеріалів або його визначеної частини автоматизовано формувати вихідні дані у вигляді файлу з тестами для імпорту у віртуальне навчальне середовище. Розв'язок задачі автоматизації формування тестових завдань містить ряд послідовних етапів перетворення інформації, до яких відносяться визначення семантичних термінів у контенті навчальних матеріалів [6, 7], безпосередньо автоматизоване формування тестових завдань [4] й перенесення результатів у область взаємодії з кінцевим користувачем – підсистему тестування середовища Moodle [8].

Характерною рисою автоматизованого формування тестових завдань за даною інформаційною технологією є використання набору моделей тестових завдань для перетворення фрагментів контенту у тестові завдання.

Модель тестового завдання являє собою структуру (рис. 2), що складається з наступних функціональних елементів:

- маска для фрагменту тексту з поняттям, що призначена для ідентифікації фрагментів контенту із заданим терміном, до яких воно може бути застосовано;
- параметри моделі тестового завдання, що визначають особливості й ефективність його застосування: тип запитання, що може бути створено за цією моделлю; базова оцінка очікуваної якості застосування моделі у діапазоні (0;1), що одержується методом експертної оцінки результатів; набір правил

корекції базової оцінки цього правила конвертації, що в залежності від вказаних особливостей фрагменту можуть знизити базову оцінку, при активації виступаючи множниками у діапазоні (0;1);

- маска для формування тестового завдання, що містить алгоритм перетворення даного фрагменту у елементи тестового завдання.

Отже, модель у даному випадку представляє собою структуру, в яку входять: набір з'єднувачів (слів або символів які вирізняють певний фрагмент тексту як релевантний відносно терміну); правило конвертації фрагментів з тексту у тестове завдання, та дані про словоформу (відмінок/рід). На вхід моделі завжди дається певна зв'язка [термін – слово маркер – теза], за якою здійснюється формування тестового завдання та підбір варіантів відповідей.

При використанні даного підходу спершу встановлюються вимоги до набору тестових завдань, визначаються актуальні моделі тестових завдань й на основі найбільш прийнятних із них формується набір тестових завдань, як це показано на рисунку 3. В результаті за кожною з обраних моделей тестових завдань формується одне тестове запитання у форматі .gift, що може бути конвертоване у середовище Moodle [9]. Кінцевий результат зберігається в одному файлі тесту.

Оскільки за інформаційною технологією автоматизованого формування тестових завдань імпорту сформованих тестових завдань до середовища Moodle буде здійснюватись з використанням формату GIFT, то є допустимим використання наступних типів тестових завдань: правильно/неправильно; множинний вибір (з однією або декількома правильними відповідями); коротка відповідь.

Таким чином, при формуванні тестових завдань різних типів використовуються моделі, наділені параметрами та критеріями, характерними лише для конкретного типу питання та будови терміну. В межах розглянутої інформаційної технології, з метою формування моделей тестових завдань є необхідною розробка набору тегів для формального опису елементів правил конвертації.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка множини тегів для формального опису елементів моделей формування тестових завдань. Це дозволить проводити як зручне й ефективне створення нових чи редагування існуючих моделей формування тестових завдань, так і компактно зберігання розроблених моделей для подальшого використання. Створювані за допомогою розробленого набору тегів моделі призначені для використання в рамках інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань [4], що забезпечує максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу та при реалізації відповідних прикладних програмних систем.

Викладення основних матеріалів дослідження

Відповідно до розглянутих складових моделей формування тестових завдань (рис. 2), виділяються теги для ідентифікації елементів контенту та теги для формування тестів.

Теги для ідентифікації елементів контенту використовуються в масках ідентифікації й наведені в таблиці 1.

Нижче наведений приклад для ідентифікації двох моделей з істинним твердженням, базової (Basic) та реверсивної (Reversed):

```
[Caps][TermGroup][connector][ThesisGroup]. {TRUE}
[Caps][ThesisGroup][connector][TermGroup]. {TRUE}
```

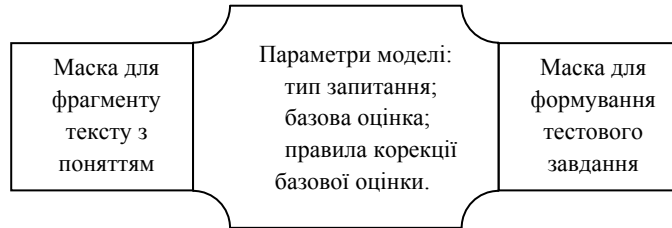


Рис. 2. Структура моделі тестового завдання



Рис. 3. Схема використання моделей для автоматизованого формування тестових завдань в інформаційній технології

Таблиця 1

Теги для ідентифікації елементів контенту

Тег	Опис
[TermGroup]	Фрагмент тексту, який являє собою термін, що складається з набору слів
[ThesisGroup]	Фрагмент тексту (теза), який дає визначення терміну
[RandomTermGroup]	Випадково обраний інший термін
[RandomThesisGroup]	Випадково обране визначення іншого терміну
[Connector]	Слово або символ із тексту, що поєднує термін з тезою (–, – це, є, називається, тощо)
[BeginSentence]	Фрагмент тексту від початку речення до TermGroup або ThesisGroup (може бути null)
[Inflexion]	Тег повертає нормальну форму наступного елементу
[Caps]	Переведення першої букви до верхнього регістру
[ReCaps]	Переведення першої букви до нижнього регістру

З використанням наведених тегів для ідентифікації елементів контенту, було розроблено наступні види масок ідентифікації елементів контенту: базова, другорядна, реверсивна, комплексна.

Базова – тип маски, яка призначена для пошуку базових визначень, які подаються у навчальному матеріалі за схемою, де спочатку зустрічається термін, а за ним – визначення, та з набором символів- і слів-з'єднувачів: [–, це, є, називається, описує, означає, представляє].

Другорядна – це тип маски, яка здійснює пошук важливих фрагментів тексту, пов'язаних з деяким терміном за допомогою другорядних сигнальних слів. Зазвичай такі фрагменти описують поведінку або залежність даного поняття: [залежить, дозволяє, визначає, забезпечує, має].

Реверсивна – це маска, яка ідентифікує фрагменти тексту с реверсивними визначеннями, де спочатку описується саме поняття, а потім слідує його назва. Такі визначення зустрічаються рідко, проте вони теж мають бути враховані при тестуванні: [є, називається/ють, описує, представляє].

Комплексна – маска, яка знаходить складні, диференційовані визначення, або описи характеристик, ознак, властивостей певного терміну. Важливою задачею даної моделі є правильне виокремлення границь фрагменту та розподіл його на тези. Такі моделі використовуються лише при створенні тестових завдань типу «вибір кількох відповідей із запропонованих»: [:, є, розрізняють, наступні, бувають, такі].

Теги для формування тестів використовуються в масках формування й наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Теги для формування тестів

Тег	Опис
{Header}	Візуальний визначник для тексту питання
{Answer}	Візуальний визначник для варіанту відповіді
{FALSE}	Вказівка на неправильний варіант відповіді
{TRUE}	Вказівка на правильний варіант відповіді

Нижче зображений приклад моделі формування тестового завдання одиночного вибору, де в якості тексту питання (Header) вказана теза, а у варіантах відповідей (Answer 1 – N) назви термінів:

```
Header -> [Caps][ThesisGroup][“-, - це”]
Answer 1 -> [TermGroup] {TRUE}
Answer 2 -> [RandomTermGroup] {FALSE}
Answer 3 -> [RandomTermGroup] {FALSE}
Answer N -> [RandomTermGroup] {FALSE}
```

Наведені теги можна віднести до елементів псевдокоду, або змінних, які під час роботи алгоритму мають різні значення, а іноді можуть не мають жодних (null). У випадках, коли тег може повернути порожнє значення, він вказується з додаванням знака дорівнює та нуля, наступним чином: [Tag = 0].

Наведений підхід дозволяє відкрити програмування алгоритму роботи різноманітних моделей генерування тестових завдань, що визначає множину формалізованих таким чином моделей як базу знань відповідної інформаційної системи для автоматизованого формування тестових завдань за навчальними матеріалами.

Практичне застосування

Для прикладу наведено процес формування тестового завдання типу «із введенням тексту» з використанням однієї з моделей формування тестових завдань для відповідного типу завдань.

Моделі формування завдань із введенням тексту полягають у формулюванні одного твердження з відсутнім ключовим словом та формуванні можливих варіантів відповідей, які не пропонуються користувачеві, а використовуються лише для перевірки введеного тексту. Відповідно, можлива модель, мета якої – забезпечити максимальну кількість правильних відповідей для коректної перевірки тексту, введеного користувачем.

При формуванні маски ідентифікації, за основу твердження береться певна пара [термін – теза], причому важливо, щоб термін був у початковій формі (називному відмінку однини), щоб виключити можливість ігнорування правильних відповідей через несхожість у закінченнях або словоформах. Далі відбувається формування набору правильних відповідей. Необхідним і достатнім є хоча б один варіант відповіді, якщо він повністю покриває можливі форми вживання даного терміну. Множина варіантів

відповідей формуються на підставі параметрів моделі.

При формуванні правильних відповідей необхідно враховувати: аббревіатуру терміну; скорочення; слова іншомовного походження (якщо є у тексті); відмінок/рід терміну.

Оскільки варіанти відповідей завжди сховані, функції цієї моделі не включають у себе підбір хибних термінів, а навпаки – модель має гарантувати, що всі можливі форми вживання цього поняття будуть розпізнані як правильна відповідь.

Отже, для сформованого на рисунку 4 тестового питання типу «Коротка відповідь» було використано термін «Вимірювання» та відповідну модель формування тестових завдань із відкритою відповіддю. Термін взятий з фрагменту тексту: «Вимірювання – це множина однотипних даних, що утворюють одну з граней гіперкуба» з теми «Моделі даних» навчального матеріалу «Організація баз даних та знань».

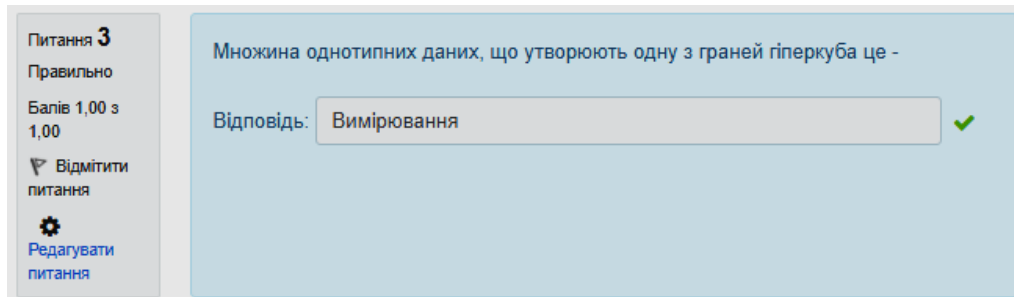


Рис. 4. Приклад використання у Moodle сформованого тестового завдання типу «Коротка відповідь»

Необхідно відмітити, що правильними відповідями є обидві з наведених, а для повної відповіді на питання достатньо вказати одну з них.

В даному випадку актуальний фрагмент тексту був знайдений наступною маскою ідентифікації: [BeginSentence][ReCaps][TermGroup][Connector][ThesisGroup].

А генерація тестового завдання за актуалізованою моделлю відбулася шляхом використання відповідної маски формування тестового завдання із таким кодом:

Header -> [Caps][_____][connector][ThesisGroup]:

Answer 1 -> [Abbreviation] {TRUE}

Answer 2 -> [TermGroup1] {TRUE}

Answer N -> [TermGroupN] {TRUE}

Відповідний сформований фрагмент GIFT-файлу, який сформований за даною моделлю формування тестового завдання типу «із введенням тексту» із відкритою відповіддю, наступний:

```
// question
```

```
Множина однотипних даних, що утворюють одну з граней гіперкуба це -
```

```
{
  =%100% Вимірювання#
  =%100% Dimension#
}
```

Отже, розроблені теги для моделей формування тестових завдань дозволяють формально описати процес формування тестових завдань із рахуванням всіх особливостей та параметрів, й забезпечити автоматизацію імпорту доступних тестових завдань у середовищі Moodle. Тег формального опису моделей є елементом псевдокоду, який призначений для формального опису структури моделі, її вхідних та вихідних параметрів.

З використанням описаного підходу, що ґрунтується на запропонованому наборі тегів, інформаційна технологія автоматизованого формування тестових завдань дозволяє забезпечити максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань онтологічної моделі навчального матеріалу [10] з подальшим перенесенням наборів тестових завдань у систему Moodle для забезпечення гнучкого тестування рівня одержаних знань [11].

За умови достатньої відповідності семантичним та структурним вимогам і коректного співвідношення між обсягом контенту навчального матеріалу та параметрів генерації набору тестових завдань, одержується репрезентативний тест, що може бути використаний як безпосередньо для тестування, так і як сировина для подальшої роботи розробника тестів.

Висновки

В статті за результатами дослідження проблеми підвищення якості перевірки рівня отриманих знань шляхом автоматизації формування тестових завдань було визначено необхідність розробки набору тегів для формального опису елементів моделей формування тестових завдань. Розроблений набір тегів дозволяє проводити як зручне й ефективно створення нових чи редагування існуючих моделей формування тестових завдань, так і компактне зберігання розроблених моделей для подальшого використання. Створювані за допомогою розробленого набору тегів моделі призначені для використання в рамках інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань, що забезпечує максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу та при реалізації відповідних

прикладних програмних систем. Подальші дослідження спрямовані на розширення бази моделей формування тестових завдань, що дозволить збільшити як на різноманітність доступних для генерації варіантів тестового завдання за окремим фрагментом тексту, так і можливість охоплення максимального обсягу контенту навчального матеріалу для формування набору тестових завдань. Окремим напрямком подальших досліджень є визначення ефективності формування наборів тестових завдань із використанням інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань загалом, а також безпосередньо створення моделей формування тестових завдань шляхом використання розробленого набору тегів.

Література

1. Нові інформаційні технології в освіті [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://it-tehnolog.com/statti/novi-informatsiyni-tehnologiyi-navchannya/>.
2. Снитюк В. Е. Интеллектуальное управление оцениванием знаний / В. Е. Снитюк, К. Н. Юрченко. – Черкасы, 2013. – 262 с.
3. 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.
4. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого формування тестових завдань / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, В. І. Кліменко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 5. – С. 93–103.
5. Мазурець О. В. Автоматизація формування тестових завдань / О. В. Мазурець // Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2016 : збірник наукових праць за матеріалами десятої міжнародної науково-технічної конференції. – Хмельницький, 2016. – С. 126–133.
6. Мазурець О. В. Інформаційна технологія автоматизованого визначення семантичних термінів в елементах навчальних матеріалів / О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2018. – № 3. – С. 223–230.
7. Krak I. The practice investigation of the information technology efficiency for automated definition of terms in the semantic content of educational materials / I. Krak, O. Barmak, O. Mazurets // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 10th International Conference of Programming UkrPROG'2016. – P. 237–245.
8. Мазурець О. В. Автоматизоване формування тестових завдань для середовища MOODLE на основі онтології навчального матеріалу / О. В. Мазурець, В. І. Кліменко, Т. К. Скрипник // Сучасні технології в механіці : збірник наукових праць. – Хмельницький, 2018. – С. 160–166.
9. Moodle – Open-source learning platform [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://moodle.org/>
10. Мазурець О. В. Онтологічний підхід до побудови семантичної моделі навчальних матеріалів / О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 6. – С. 223–229.
11. Бармак О. В. Застосування інформаційної технології гнучкого тестування рівня знань у середовищі Moodle / О. В. Бармак, О. В. Мазурець, А. О. Матвійчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2017. – № 3. – С. 103–115.

References

1. IT-TEHNOLOG (2018) New Information Technologies in Education. [Online] Available from: <http://it-tehnolog.com/statti/novi-informatsiyni-tehnologiyi-navchannya/> [Accessed: 11 June 2018]
2. SNYTYUK, V. E. & YURCHENKO K. N. (2013) Intelligent Management of Knowledge Assessment. Cherkassy.
3. 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 Xth international scientific and technical conference “Actual Problems of Computer Technologies 2016”. p. 77-84.
4. 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.
5. MAZURETS, O. V. (2016) Automation of the Formation of Test Tasks // Collection of scientific works on the materials of the Xth international scientific and technical conference “Actual Problems of Computer Technologies 2016”. p. 126-133.
6. 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.
7. KRAK, I., BARMAK, O. & MAZURETS, O. (2016) The Practice Investigation of the Information Technology Efficiency for Automated Definition of Terms in the Semantic Content of Educational Materials. CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the 10th International Conference of Programming UkrPROG'2016. p. 237-245.
8. MAZURETS, O. V., KLIMENKO, V. I. & SKRYPNIK T. K. (2017) Automated Formation of Test Tasks for the Environment MOODLE on the Basis of the Ontology of Educational Material. Collection of scientific works “Modern Technologies in Mechanics 2018”. p. 160-166.
9. MOODLE (2018) Moodle – Open-source learning platform. [Online] Available from: <https://moodle.org/> [Accessed: 11 June 2018]
10. 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.
11. MAZURETS, O. V., KOVALCHYK, O. V. & MATVIICHUK, A. O. (2017) Applying of the Information Technology of the Flexible Testing of Knowledges Level in Moodle Environment // Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences, Issue 3, 2017 (247). p. 103-115.

Рецензія/Peer review : 02.07.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мазурець О.В.

ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕНЬ ЦІЛІСНОСТІ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТУ ШЛЯХОМ ПЕРЕХРЕСНОГО ХЕШУВАННЯ

Масове впровадження та використання електронного документообігу спричинило появу такого явища, як підробка електронних документів. Стаття присвячена розробці методу виявлення фальсифікацій в електронних документах для підвищення достовірності інформації. На основі використання методів обчислення хеш-функції електронного документу було побудовано метод перехресного хешування, який дає змогу виявити фальсифікований фрагмент інформації. В статті запропонований новий метод, який дозволяє виявити порушення цілісності електронного документу, вказавши на конкретний інформаційний блок, в якому відбулися зміни. Для цього введено поняття міні хеш-функцій, які спочатку обчислюються послідовно для кожного горизонтального, потім – для кожного вертикального блоку інформації. В разі порушення цілісності електронного документу, невідповідність значень міні хеш-функцій вкаже на перетині якого рядка і стовпця був змінений блок інформації.

Ключові слова: електронний документ, порушення цілісності, хеш-функція, перехресне хешування, матричні криптографічні перетворення.

I.O. ROZLOMIY
Cherkassy State Business College
G.V. KOSENYUK
Cherkassy Bogdan Khmelnytsky National University

DETECTION OF VIOLATIONS OF ELECTRONIC DOCUMENTS INTEGRITY BY CROSS-HASHING

Mass implementation and using of electronic documents led to the emergence of such the fact as of counterfeiting of electronic documents. The article is devoted to actual issues of developing new and improving existing methods and tools of counteracting falsifications of electronic documents. The method of cross-hashing based on the use of methods for calculating the hash function of an electronic document has been constructed, which enables to detect a fake fragment of information. A new approach that can detect of violations of integrity of the electronic document and it points to specific changed information block was proposed in the article. For this goal, the notion of mini hash functions was introduced that originally calculated for each of horizontal blocks, then – for each of vertical blocks of information. Mini hash functions can be calculated by any hashing method. The model for calculating mini hash functions is based on the use of matrix cryptographic transformation operations has been showed in the article. In case of violation of integrity of the electronic document disparity of values between mini hash functions will point at the intersection whose of row and column has been changed block of information. Thus, an important scientific task of developing a method for detecting falsifications in an electronic document was solved.

Keywords: electronic document, violations of integrity, a hash function, cross-hashing, cryptographic transformation matrix.

Вступ. Об'єм цифрової документованої інформації, яку доводиться зберігати, передавати постійно зростає, з'являються системи електронного документування [1]. Сучасні методи накопичення, обробки та передачі електронних документів (ЕД) сприяли появі загроз, пов'язаних з можливістю порушення цілісності інформації. Одним з ефективних способів забезпечення цілісності ЕД є накладання електронного цифрового підпису (ЕЦП), який в найпростішому випадку є результатом обчислення хеш-функції. Тому, очевидно є актуальність розробки алгоритмів хешування. Досить часто виникає необхідність передачі конфіденційних електронних документів. Звичайно, необхідна абсолютна впевненість в тому, що переданий через мережу ЕД повністю ідентичний оригіналу і його основний зміст не був змінений в процесі передачі чи зберігання. Для цього існують засоби ідентифікації цифрової інформації, одним з яких є хешування.

Постановка проблеми. Зважаючи на те, що рівень злочинності в сфері інформаційних технологій постійно зростає, підробка електронних документів набула рис масового явища. Існуючі механізми забезпечення цілісності ЕД, цифровий підпис, зокрема, можуть лише підтвердити чи спростувати факт порушення цілісності інформації. До тепер, ніхто з науковців не займався пошуком методів виявлення підробки в електронних документах. Це питання є досить актуальним, насамперед, тому, що важливо розуміти, який конкретно фрагмент документу був змінений, підроблений. На основі реалізації запропонованого методу виявлення порушень цілісності ЕД, можна робити висновки про мету підробки, визначити круг підозрюваних в здійсненні злочину – фальсифікації документів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. [2–4] показує, що операції прямого та оберненого матричного перетворення є придатними для побудови алгоритмів обчислення хеш-функції, якщо при цьому виконуються всі умови невиродженості матриці. В статті [5] було запропоновано методи обчислення хеш-функції електронного документу, які базуються на матричних криптографічних перетвореннях. Отримані в попередніх дослідженнях результати є основою для створення нового методу виявлення порушень цілісності ЕД шляхом перехресного хешування.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є розробка методу виявлення фальсифікацій в ЕД шляхом перехресного хешування.

Виклад основного матеріалу. Як вже говорилося раніше, хешування є одним з основних способів ідентифікації даних. Функція хешування – детермінована функція, на вхід якої подається масив бітів довільного розміру, а на виході отримуємо фіксовану контрольну суму. Контрольна сума – обчислене значення, яке ідентифікує ЕД і є найпростішим способом перевірки цілісності цифрових даних. Обчислення

хеш-функції повністю всього ЕД дає змогу отримати контрольну суму, фіксовану кількість бітів, яка об'єднавшись з документом служитиме найпростішим варіантом ЕЦП. Наявність ЕЦП свідчитиме про автентичність та цілісність інформації при виконанні механізму перевірки підпису. Для перевірки цілісності ЕД отримувач підписаного ЕД обчислює значення хеш-функції і порівнює його з самостійно згенерованим значенням. Тобто в разі порушення цілісності ЕД – навмисних чи випадкових змін в документі, невідповідність значень хеш-функції говоритиме про факт підробки документу.

Завдання захисту ЕД зводиться не тільки до забезпечення цілісності інформації. В багатьох випадках не достатньо знати лише те чи відбулися зміни в ЕД, чи ні. Важливо розуміти, де конкретно в документі відбулися зміни. Тому, вкрай важливим є завдання пошуку способів виявлення фальсифікацій в електронних документах. Для цього, як один з варіантів, можна запропонувати метод, який базується на використанні алгоритмів хешування.

Суть запропонованого методу виявлення фальсифікацій в електронному документі полягає в поблоковому обчисленні хеш-функції електронного документа. Для цього ЕД потрібно розбити на інформаційні блоки однакового розміру, як показано на рис. 1.

A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	...	A_{1n}
A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	...	A_{2n}
A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}	...	A_{3n}
A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}	...	A_{4n}
...
A_{n1}	A_{n2}	A_{n3}	A_{n4}	...	A_{nn}

Рис. 1. Поділ електронного документа на фрагменти інформації

З рис. 1 видно, що ЕД розбивається на блоки A_{ij} , де $i \in [1, n]$, $j \in [1, n]$. Далі, необхідно обчислити значення хеш-функції кожного блоку інформації, введемо для них поняття міні хеш-функції.

Обчислення міні хеш-функцій виконуються по аналогії з обчисленням хеш-функції всього електронного документа, як показано в статті [5] і для знаходження міні хеш-функцій може бути використаний будь-який з запропонованих в статті [5] алгоритмів.

Позначимо через послідовність $F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1n}$ обчислені значення хеш-функцій кожного горизонтального блоку інформації. Значення міні хеш-функцій горизонтальних блоків можна представити у вигляді системи (1).

$$\begin{cases} F_{21} = F(A_{11}) \cup F(A_{21}) \cup \dots \cup F(A_{n1}); \\ F_{22} = F(A_{12}) \cup F(A_{22}) \cup \dots \cup F(A_{n2}); \\ \dots \\ F_{2n} = F(A_{1n}) \cup F(A_{2n}) \cup \dots \cup F(A_{nn}). \end{cases} \quad (1)$$

Аналогічно $F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2n}$ – міні хеш-функції вертикальних блоків інформації, як показано на рис. 2. Значення міні хеш-функцій вертикальних блоків представлені системою (2).

$$\begin{cases} F_{21} = F(A_{11}) \cup F(A_{21}) \cup \dots \cup F(A_{n1}); \\ F_{22} = F(A_{12}) \cup F(A_{22}) \cup \dots \cup F(A_{n2}); \\ \dots \\ F_{2n} = F(A_{1n}) \cup F(A_{2n}) \cup \dots \cup F(A_{nn}). \end{cases} \quad (2)$$

Для обчислення міні хеш-функцій введемо деякі позначення. Нехай ключова матриця задана виразом (3).

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2m} \\ \dots \\ a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mm} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де $a_{ij} \in [0,1]$; – коефіцієнти ключової матриці, тоді матриця міні хеш-функції, буде задана виразом (4).

$$F_{ij} = \begin{pmatrix} b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n} \\ b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2n} \\ \dots \\ b_{n1}, b_{n2}, \dots, b_{nn} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де $b_{ij} \in [0,1]$ – коефіцієнти матриці міні хеш-функції.

В найпростішому випадку можна використати алгоритм послідовного додавання до одного рядка матриці іншого рядка, вибраного на основі аналізу фрагменту інформації.

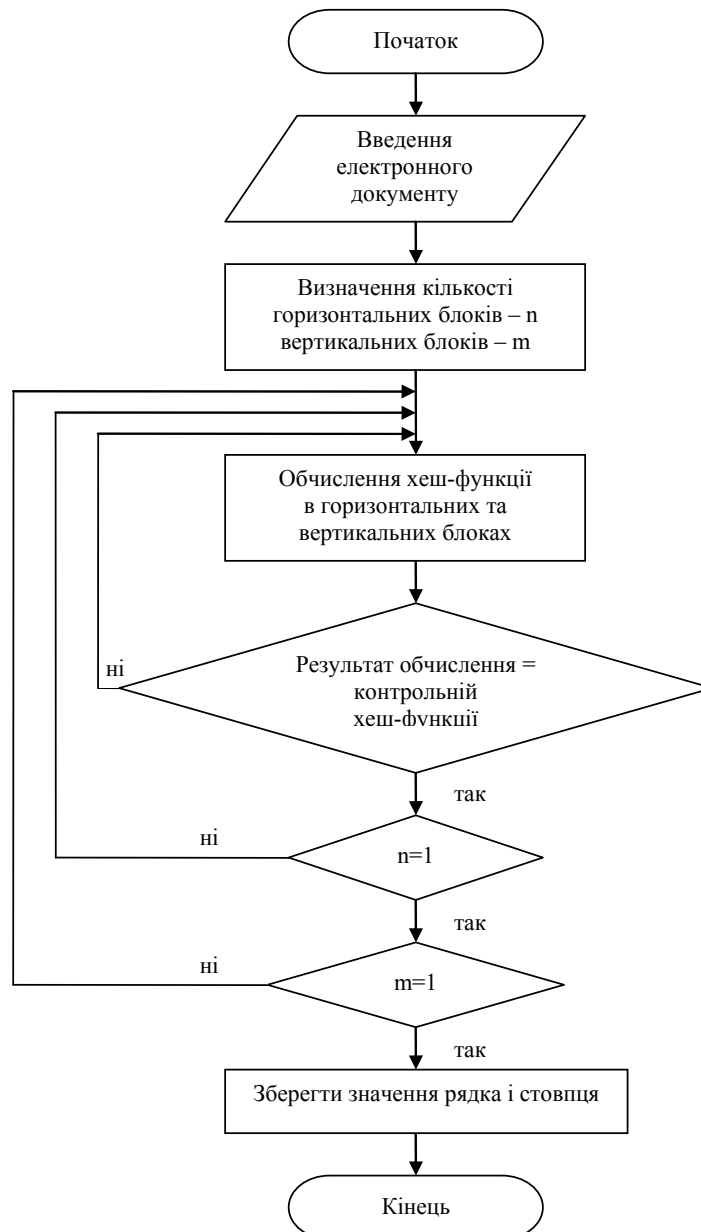


Рис. 3. Алгоритм виявлення фальсифікованого фрагменту електронного документу методом перехресного хешування

Процес обчислення міні хеш-функцій з заданої ключової матриці описується моделлю (5).

$$F_{ij} = \begin{pmatrix} b_{11}(a_{11} \oplus a_{21}), b_{12}(a_{12} \oplus a_{22}), \dots, b_{1n}(a_{1n} \oplus a_{2n}) \\ b_{21}(a_{21} \oplus a_{n1}), b_{22}(a_{22} \oplus a_{n2}), \dots, b_{2n}(a_{2n} \oplus a_{nn}) \\ \dots \\ b_{n1}(a_{n1} \oplus a_{11}), b_{n2}(a_{n2} \oplus a_{12}), \dots, b_{nn}(a_{nn} \oplus a_{1n}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

На рис. 3 показана блок-схема алгоритму виявлення фальсифікованого фрагменту електронного документу методом перехресного хешування.

Суть даного алгоритму обчислення міні хеш-функцій можна описати такими кроками:

1) на основі матричних криптографічних перетворень обчислюємо значення міні хеш-функцій $F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1n}$, за описаною вище моделлю;

2) далі послідовно потрібно обчислити значення міні хеш-функцій вертикальних блоків інформації $F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2n}$.

В разі здійснення змін, модифікацій в ЕД, звичайно, зміняться і значення міні хеш-функцій. На основі того, які конкретно міні хеш-функції при повторному обчисленні змінили своє значення можна судити в якому саме інформаційному блоці ЕД відбулося порушення цілісності. Тобто горизонтальна міні хеш-функція вкаже на рядок, вертикальна – на стовпець, на перетині яких була змінена інформація, рис. 4.

A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	...	A_{1n}	Обчислення міні хеш- функцій $F(A_{ij})$	F_{11}
A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	...	A_{2n}		F_{12}
A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}	...	A_{3n}		F_{13}
A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}	...	A_{4n}		F_{14}
...
A_{n1}	A_{n2}	A_{n3}	A_{n4}	...	A_{nn}		F_{1n}
Обчислення міні хеш-функцій $F(A_{ij})$							
F_{21}	F_{22}	F_{23}	F_{24}	...	F_{2n}		

Рис. 2. Обчислення міні хеш-функцій

A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	...	A_{1n}	F_{11}
A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	...	A_{2n}	F_{12}
A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}	...	A_{3n}	F_{13}
A_{41}	A_{42}	A_{43}	A_{44}	...	A_{4n}	F_{14}
...
A_{n1}	A_{n2}	A_{n3}	A_{n4}	...	A_{nn}	F_{1n}
F_{21}	F_{22}	F_{23}	F_{24}	...	F_{2n}	

Рис. 4. Виявлення фальсифікованого фрагменту інформації

З рис. 3 видно, що при перевірці, міні хеш-функції F_{24} і F_{13} змінили своє значення, це означає, що в інформаційному блоці A_{34} відбулися зміни, тобто даний фрагмент електронного документу був фальсифікований (6).

$$F_{13} \cap F_{24} \rightarrow A_{34} \quad (6)$$

Висновки. В статті було розкрито питання пошуку шляхів забезпечення цілісності електронних документів. В підсумку було розроблено метод виявлення фальсифікацій в ЕД шляхом перехресного хешування. Запропонований метод базується на знаходженні хеш-функцій блоків інформації. У результаті проведених досліджень, можна зробити висновки, що для реалізації даного методу можна використовувати будь-який алгоритм обчислення хеш-функцій. Як один з варіантів, показаний алгоритм обчислення міні хеш-функцій, на основі послідовного виконання операції додавання за модулем рядків матриці.

Таким чином, запропонований метод дозволить виявляти зміни в електронному документі, на основі яких можна робити припущення про мету підробки та можливих зловмисників.

Література

1. Сабанов А.А. Некоторые аспекты защиты электронного документооборота / А.А. Сабанов // Connect! Мир связи. – 2010. – № 7. – С. 62–64.
2. Рудницький В. М. Метод синтезу матричних моделей операцій криптографічного кодування та декодування інформації / В. М. Рудницький, В. Г. Бабенко, С. В. Рудницький // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2012. – № 4 (33). – С. 198–200.
3. Миронець І.В. Підвищення достовірності процесу матричного криптографічного перетворення / І.В. Миронець // Інформаційні технології та системи управління. – 2015. – № 5/6(25). – С. 52–54.
4. Голуб С. В. Метод синтезу операцій криптографічного перетворення на основі додавання за модулем два / С. В. Голуб, В. Г. Бабенко, С. В. Рудницький // Системи обробки інформації : зб. наук. праць. – 2012. – № 3(101). – С. 119–122.
5. Розломий І.О. Методи обчислення хеш-функції електронного документу на основі матричних криптографічних перетворень / І.О. Розломий // Вісник ЧДТУ. Технічні науки. – 2016. – № 4. – С. 88–94.

References

1. Sabanov A.A. (2010) Some Aspects of Electronic Document Work Protection Connect! The world of communication, 7, pp. 62–64.
2. Rudnitsky V.M., Babenko V.G. and Rudnitsky S.V. (2012) The synthesis method of matrix models of cryptographic operations data encoding and decoding. Proceedings of Kharkiv Air Force University, 4, pp. 198–200.
3. Myronets I.V. (2015) Increased process reliability matrix cryptographic transformation. Information Technology and management systems, 5/6 (25), pp. 52–54.
4. Golub S.V., Babenko V.G. and Rudnitsky S.V. (2012) The method of synthesis of the operations cryptographic transformations on the basis of addition modulo two. Information processing systems, 3 (101), pp. 119–122.
5. Rozlomi I.O. (2016) The methods of calculating of hash function of electronic documents on the basis of matrix cryptographic transformation. Bulletin of Cherkasy State Technological University. Series: Technical sciences, 4, pp. 88–94.

**ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА МАКСИМАЛЬНОГО ПОТОКА ДЛЯ
ТРЕХПОЛЮСНОГО ГРАФА СЕТИ**

В работе рассматриваются некоторые вопросы верификации программного алгоритма для нахождения максимального потока в открытом трехполосном взвешенном графе телекоммуникационной сети со свободно ориентированными ребрами. Данный алгоритм впервые предложен на кафедре сетей связи Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова. Особенностью данного алгоритма вычисления максимального потока является его многоуровневая иерархическая структура, которая начинается от простейшего трехполосного примитива с одним узлом и тремя внешними связями, получившим название «триджет». Для тестирования алгоритма максимального потока в трехполосной сети построено древовидное пространство состояний на основе классов фон Неймана. Каждый класс состояний алгоритма определяет неограниченное подмножество реализаций полно-связного графа общего типа с заданным количеством вершин. Для каждого класса состояний выбран эталонный представитель класса, для которого задача о максимальном потоке имеет аналитическое решение. На основании классов состояний алгоритма построена тестовая таблица, по которой был проверен программный алгоритм расчета.

Ключевые слова: трехполосный граф, максимальный поток, верификация алгоритма, классы состояний.

O.V. TYKHONOVA, O.M. YAVORSKAYA, V.V. BEREZOVSKIY
O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

VERIFICATION OF THE MAXFLOW ALGORITHM FOR A THREE-POLE NETWORK GRAPH

The paper discusses some issues of verifying a software algorithm for finding the maximum flow in an open three-pole weighted graph of a telecommunications network with free-oriented edges. This algorithm developed at the Telecommunication Networks Department of A.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications. The purpose of this paper is constructing a methodology for verifying the algorithm of maximum flow problem solving on a three-pole network graph with an arbitrary topology and six nodes. In this paper, we analyzed the features of various methods for verifying algorithms and testing applied software. A general scheme of the algorithm for solving the maximum flow problem on a three-pole weighted fully connected graph with six vertices is considered. The peculiarity of this algorithm for calculating the maximum flow is its multilevel hierarchical structure, which starts from the simplest three-pole primitive with one node and three external links, called the "triget". For the algorithm under consideration, a three-level state space is constructed on the basis of the von Neumann classes. Each class of states of the algorithm defines an unlimited subset of realizations on a graph of general type with a given number of vertices. For each class of states, a representative of the class is chosen for which the maximum flow task has an analytic solution. Based on the state classes of the algorithm, a test table is constructed, according to which the software algorithm of calculation has been verified. Verification and testing of complex software algorithms is a non-trivial scientific and engineering task that is difficult to automate, and in many cases requires an individual approach. In this paper, a methodology constructed for verifying the algorithm of maximum flow problem solving for a telecommunication network, which is represented by an open three-pole weighted graph with free-oriented edges.

Keywords: Maxflow problem, free-oriented graph, multi pole telecom network, dynamic channel configuration.

Введение. Постановка задачи. Верификация программного обеспечения является актуальной и достаточно сложной задачей в области разработки интерфейсов прикладного программирования. В данной работе рассматривается задача тестирования программного алгоритма для нахождения максимального потока на трехполосном открытом взвешенном графе сети со свободно ориентированными ребрами; этот алгоритм разработан на кафедре сетей связи Одесской национальной академии связи, [1]. В отличие от известных алгоритмов для нахождения максимального потока на графе сети, данный алгоритм находит максимально возможный суммарный поток между тремя парами открытых полюсов на графе сети. При этом, данный поток не зависит от направления отдельных составляющих любого потока, а также от распределения весов каждого ребра графа в прямом и обратном направлении. В основе алгоритма лежат три положения:

а) аналитически полученное решение задачи о максимальном потоке для простейшего трехполосного графа сети с одним узлом и тремя открытыми свободно ориентированными ребрами (этот граф назван «триджет») [2];

б) принцип минимального блокирующего потока между всеми парами полюсов; согласно этому принципу, в первую очередь, анализируются независимые потоки между всеми парами полюсов, которые протекают по кратчайшим путям в метрике переходов по ребрам (hops);

в) принцип сведения сложной задачи на общем графе к решению нескольких простых задач на примитивных графах, для которых ранее получены т.н. элементарные алгоритмы (cellular algorithms).

На основе этих положений, в работе [3] получен алгоритм нахождения максимального потока на полно-связном графе из трех узлов с тремя открытыми ребрами (названного «триплет»). Алгоритмы решения задачи о максимальном потоке для двух примитивных трехполосных графов (типа «триджет» и «триплет») лежат в основе более общего алгоритма для отыскания максимального потока на графе общего вида из шести вершин.

В силу того, что два из трех названных выше базовых положений алгоритма носят эвристический характер, в целом, алгоритм отыскания максимального потока на трехполосном графе пока еще не имеет исчерпывающе строгого доказательства для общего случая. Такая ситуация характерна для многих эмпирически полученных решений сложных задач (например, компьютерные программы для игры в шахматы). Поэтому методика тестирования и обоснования корректности таких алгоритмов является важной составляющей для метода решения содержательной задачи.

Целью данной работы является построение методики для верификации алгоритма решения задачи о максимальном потоке на трехполюсном графе сети с произвольной топологией и шестью узлами.

Особенности известных методов верификации программного обеспечения

Ключевым вопросом в области верификации алгоритмов и их программных реализаций является степень полноты для процедур тестирования [4]. Опыт показывает, что сложные программные продукты, как правило, не могут быть исчерпывающе протестированы в силу огромного числа возможных состояний входных данных [5]. Существуют различные подходы и методики верификации программных алгоритмов, например, статистический анализ области определения алгоритма методом Монте-Карло [6], построение множества возможных сценариев для входных данных (scenario based software architecture evaluation, [7]), динамические способы мониторинга и тестирования [8] и др. В области тестирования программного обеспечения используются понятия «альфа-тестирование» и «бета-тестирование». Альфа-тестирование является первым этапом предварительного тестирования программного продукта силами самих разработчиков. Бета-тестирование является вторым этапом, и осуществляется пользователями программного продукта.

Достаточно подробное изложение различных подходов к верификации программного обеспечения дано в работах [9, 10]. В частности, в [9] рассматривается методика на основе специально разработанных сценариев и критериев адекватности тестирования (test adequacy criteria). Различные сценарии включают в себя классы эквивалентности состояний алгоритма. Известны различные критерии полноты, однако абсолютно «полное» тестирование невозможно для практически значимых систем. При подготовке тестирования формируется некоторый набор тестов, а отладка программного кода с помощью тестов служит для устранения различного рода ошибок в текстах программ (как синтаксических, так и семантических). По результатам отладки может потребоваться расширение набора тестов.

В работе [10] отмечается, что разработка плана тестирования программного продукта начинается с построения набора тестовых примеров, которые отражают наиболее характерные сценарии реальных условий функционирования алгоритма. Основными приемами такого тестирования являются методы «черного ящика» (Black box testing), «белого ящика» (White Box testing) и серого ящика» (Grey Box testing), [11]. Генерация набора сценариев на практике является одним из наиболее эффективных методов верификации программ; но в то же время, он труднее всего поддается автоматизации и формализации, поскольку предполагает сложный логический анализ ситуативного поведения алгоритмов. Такой анализ, по-прежнему, является исключительной прерогативой человеческого интеллекта. Иными словами, создание методики тестирования для достаточно сложных программных алгоритмов является нетривиальной интеллектуальной задачей (искусством инженера-математика), которую необходимо решать в каждом конкретном случае [12].

Общая схема решения задачи о максимальном потоке для трехполюсного графа

Среди открытых публикаций о максимальном потоке в сети авторам неизвестны исследования открытых графов с числом полюсов больше чем два и со свободно ориентированными ребрами (кроме указанных выше работ [1–3]). Большинство алгоритмов о максимальном потоке рассматриваются на ориентированном графе с двумя специальными вершинами (исток S и сток T). Известны также обобщения задачи о максимальном потоке на ориентированном двудольном графе со многими истоками и многими стоками. Последний случай легко сводится к графу с одним истоком и одним стоком. Такого рода модели сетей достаточно адекватно описывают традиционные логистические системы и транспортные потоки, в которых конкретный продукт имеет вполне определенное направление перемещения. Например, едва ли имел бы практическое применение газопровод, в котором газ одновременно движется во встречных направлениях.

Вместе с тем, современные телекоммуникационные транспортные сети имеют двунаправленные информационные потоки в каждом канале. При этом емкость канала может динамически изменяться в прямом и обратном направлении в зависимости от характера нагрузки, а число открытых полюсов может быть больше двух. Ввиду отсутствия накопленного опыта исследования подобного рода задач, общая схема нахождения максимального потока в многополюсной сети сформулирована по принципу постепенного перехода от сравнительно простых моделей сетей к все более сложным сетевым структурам. На первом этапе была поставлена задача исследования трехполюсной открытой сети произвольной топологии с ограниченным количеством узлов (до шести). Решение данной задачи позволяет добавить еще один примитивный граф («фрактал») к полученному ранее набору из двух типовых примитивов («триджет» и «триплет»).

Общее количество ребер на трехполюсном графе с шестью вершинами равно 18 (15 внутренних ребер и три открытых внешних ребра на полюсах графа); граф такого типа обозначен как фрактал, рис.1. Общий поток на трехполюсном графе определен как сумма всех возможных потоков, протекающих между тремя парами полюсов (вершины графа с номерами 1, 2, 3) через открытые (внешние) ребра a_1, a_2, a_3 .

Полные потоки между тремя парами полюсов обозначены на рис.1 как f_1, f_2, f_3 . При этом суммарный поток равен $f_{\Sigma} = f_1 + f_2 + f_3$.

Согласно приведенному выше принципу минимального блокирующего потока, все потоки фрактала разделены на классы иерархии (классы фон Неймана, [13]). Потоки нулевого уровня иерархии протекают по

путям, в которых количество внутренних ребер равно нулю (т.е. потоки через два внешних ребра простейшего открытого трехполюсного графа с одной вершиной, названного «триджет», рис. 2).

Несмотря на столь простую структуру графа типа «триджет», решение задачи о максимальном потоке для этого графа не является тривиальным и очевидным. Например, для значений $a_1 = 4$, $a_2 = 5$, $a_3 = 6$, максимально возможный суммарный поток равен 7.5 (точный алгоритм расчета максимального потока для такого графа доказан дедуктивно в [2]). Получить это значение (вместе с конкретизацией трех составляющих этого потока) достаточно непросто. Данный факт неоднократно проверен на контрольных задачах для студентов ОНАС им. А.С. Попова в курсе «Моделирование сетей и систем». В данном случае, составляющие максимального потока равны: $f_1 = 3.5$, $f_2 = 2.5$, $f_3 = 1.5$. При этом по каждому из трех открытых ребер протекает суммарный поток, в точности равный весу ребра:

$$f_{a1} = f_2 + f_3 = 2.5 + 1.5 = 4; f_{a2} = f_1 + f_3 = 3.5 + 1.5 = 5; f_{a3} = f_1 + f_2 = 3.5 + 2.5 = 6.$$

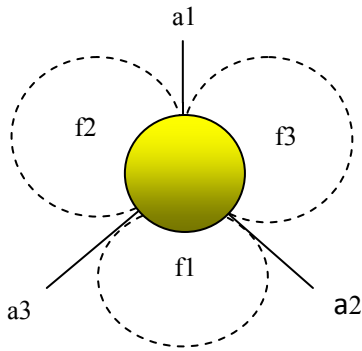


Рис. 2. Открытый простейший трехполюсный граф (триджет)

триплета на рис. 3. Для этого веса открытых ребер фрактала на рис. 1 принимаются сколь угодно большими (т.е. такими, которые не ограничивают потоки во фрактале). Поэтому потоки между всеми парами полюсов зависят только от внутренних ребер фрактала. После расчета всех возможных потоков, фрактал легко приводится к схеме треугольника, ребра которого имеют веса, равные соответствующим промежуточным потокам фрактала f_1, f_2, f_3 .

Вторая часть алгоритма. Из внешних ребер фрактала и эквивалентного треугольника внутренней проводимости между парами полюсов (с весами f_1, f_2, f_3) строится триплет, для которого имеется процедура вычисления максимального потока; данный поток и есть окончательный максимальный поток всего фрактала.

Таким образом, основные усилия по созданию и верификации алгоритма максимального потока для фрактала касаются вопроса построения эквивалентного треугольника проводимости фрактала между парами

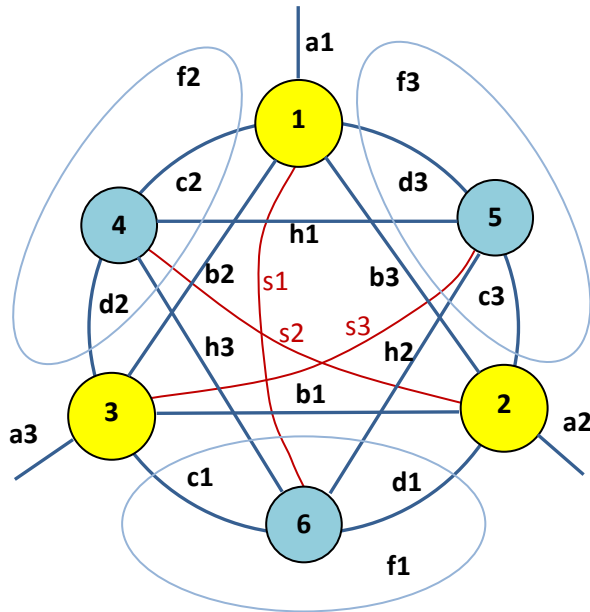


Рис. 1. Открытый полно-связный трехполюсный граф из шести вершин (фрактал)

Отметим, что в традиционной постановке (для графа с одним истоком и одним стоком) данная задача не может быть решена известными алгоритмами.

Потоки первого уровня протекают по путям, содержащим одно внутренне ребро. Типовой трехполюсный граф такого типа (триплет) показан на рис.3. Для графа типа «триплет» также получено достаточно строгое алгоритмическое решение задачи о максимальном потоке, в основе которого лежит промежуточное вспомогательное преобразование триплета к схеме, эквивалентной графу «триджет» ([2, 3]).

Алгоритм решения задачи о максимальном потоке на графе типа «фрактал» (рис. 1) разделяется на две основных части.

Первая часть алгоритма. Фрактал приводится к промежуточной форме внутреннего треугольника в составе

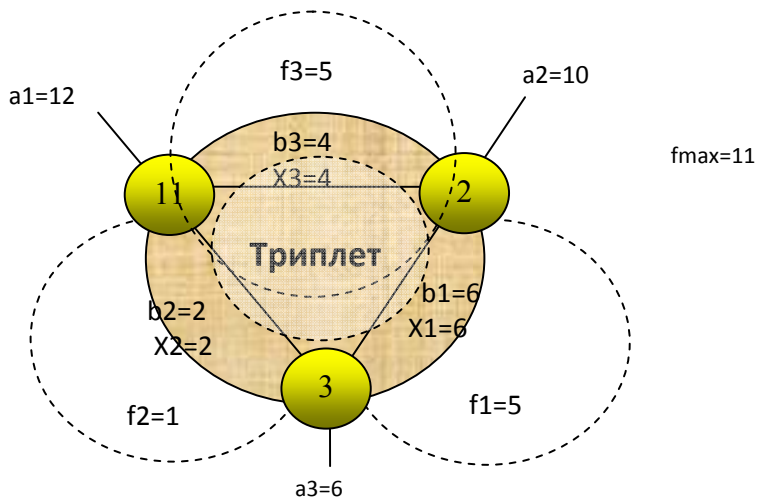


Рис. 3. Открытый трехполюсный граф типа "триплет"

поллюсов (т.е. к расчету трех промежуточных потоков f_1, f_2, f_3). Данный алгоритм строится для усеченного фрактала с 15 внутренними ребрами (внешние ребра не принимаются во внимание). Эта часть программного алгоритма названа **Triangle**.

Построение дерева сценариев. Классы состояний алгоритма. Множество различных сценариев работы алгоритма для расчета максимального потока на трехполлюсном графе типа «усеченный фрактал» (без учета влияния открытых внешних ребер) разбивается на иерархические классы (известные как «классы фон Неймана», [13]). Структура этих классов является строго древовидной, и подчинена упомянутому выше эвристическому принципу минимального блокирующего потока на каждом шаге алгоритма.

Сценарий первого уровня: вычисление потоков типа « x » по кратчайшим (одношаговым) путям между полюсами; таких путей три (по ребрам b_1, b_2, b_3 на рис. 1). Эти составляющие потоков в алгоритме обозначены индексированной переменной x_1, x_2, x_3 , т.е. $x_1=b_1; \dots x_2=b_2; \dots x_3=b_3$. После реализации данного сценария три ребра b_1, b_2, b_3 на рис.1 получают нулевые остаточные веса и в дальнейших сценариях не участвуют. В остатке от усеченного фрактала на рис.1 остаются $15-3=12$ ребер.

Сценарий второго уровня: вычисление потоков типа « y », каждый из которых протекает по двум внутренним ребрам. Если в качестве таких путей взять пути по кольцу (между каждой парой полюсов есть пары независимых ребер на кольце), то после вычисления потоков из шести ребер как минимум три получат нулевые остаточные веса, и возможно три остальных будут иметь ненулевые веса. Такой вариант не удовлетворяет принципу минимального блокирующего потока. Действительно, если в качестве двушаговых путей рассмотреть три независимых элементарных графа типа «триджет (с центрами в вершинах 4, 5, 6 на рис.1), то из 9 ребер в остатке могут быть не более 3 ребер; степень блокировки ребер во втором случае меньше: $3/6 > 3/9$.

Сценарии первых двух уровней являются линейными (в них не используются операторы *if*).

В сценарии второго уровня для каждой пары полюсов вычисляются три составляющие из общего максимального потока:

$$\begin{cases} Y_1 = y_{11} + y_{12} + y_{13}, \\ Y_2 = y_{21} + y_{22} + y_{23}, \\ Y_3 = y_{31} + y_{32} + y_{33}, \end{cases} \quad (1)$$

где y_{11} – составляющая потока f_1 между полюсами 2 и 3, которая протекает по ребрам c_1, d_1 первого триджета (вершина 6, ребра c_1, d_1, s_1);

y_{12} – составляющая потока f_1 между полюсами 2 и 3, которая протекает по ребрам s_2, d_2 второго триджета (вершина 4, ребра c_2, d_2, s_2);

y_{13} – составляющая потока f_1 между полюсами 2 и 3, которая протекает по ребрам c_3, s_3 третьего триджета (вершина 5, ребра c_3, d_3, s_3);

y_{21} – составляющая потока f_2 между полюсами 1 и 3, которая протекает по ребрам c_1, d_1, s_1 первого триджета (вершина 6, ребра c_1, d_1, s_1);

y_{22} – составляющая потока f_2 между полюсами 1 и 3, которая протекает по ребрам c_2, d_2, s_2 второго триджета (вершина 4, ребра c_2, d_2, s_2);

y_{23} – составляющая потока f_2 между полюсами 1 и 3, которая протекает по ребрам d_3, s_3 третьего триджета (вершина 5, ребра c_3, d_3, s_3);

y_{31} – составляющая потока f_3 между полюсами 1 и 2, которая протекает по ребрам s_1, d_1 первого триджета (вершина 6, ребра c_1, d_1, s_1);

y_{32} – составляющая потока f_3 между полюсами 1 и 2, которая протекает по ребрам s_2, c_2 второго триджета (вершина 4, ребра c_2, d_2, s_2);

y_{33} – составляющая потока f_3 между полюсами 1 и 2, которая протекает по ребрам c_3, d_3 третьего триджета (вершина 5, ребра c_3, d_3, s_3).

Сценарии третьего уровня: вычисление потоков, которые проходят по трем внутренним ребрам. Общее количество ребер фрактала на рис.1, которые могут остаться с ненулевыми весами после рассмотрения сценариев первого и второго уровней, равно $15-3-6=6$. Однако точное расположение ненулевых остаточных ребер заранее неизвестно, поскольку оно зависит от конкретных значений исходных данных (начальных весов всех 15 ребер). В программном алгоритме Triangle выделены следующие четыре класса сценариев:

3.1. На главном кольце фрактала (рис.1) остались три ребра. Внутри этого сценария могут быть следующие восемь случаев:

$(c_1, c_2, c_3); (c_1, c_2, d_3); (c_1, d_2, c_3); (c_1, d_2, d_3); (d_1, c_2, c_3); (d_1, c_2, d_3); (d_1, d_2, c_3); (d_1, d_2, d_3)$.

3.2. На главном кольце фрактала (рис.1) остались два ребра. Внутри этого сценария могут быть следующие восемь случаев:

$(c_1, c_2); (c_1, c_3); (c_1, d_2); (c_1, d_3); (d_1, c_2); (d_1, c_3); (d_1, d_2); (d_1, d_3)$.

3.3. На главном кольце фрактала (рис. 1) осталось одно ребро. Внутри этого сценария могут быть следующие шесть случаев: $(c_1); (c_2); (c_3); (d_1); (d_2); (d_3)$.

3.4. На главном кольце фрактала (рис. 1) не осталось ни одного ребра. Это означает, что могли остаться ребра s_1, s_2, s_3 , а также h_1, h_2, h_3 . Нетрудно увидеть, что этот сценарий приводится к типовому структурному примитиву «триплет» (см. рис. 3). Треугольник этого триплета образован вершинами 4, 5, 6 и

ребрами h_1, h_2, h_3 ; роль открытых ребер триплета играют ребра s_1, s_2, s_3 .

Таблица 1

Таблица тестирования для вариантов сценария третьего уровня

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
c1	5	5	5	5	1	1	1	1	6	6	6	6	1	1	1	1	1
c2	5	5	1	1	5	5	1	1	6	1	1	1	6	1	1	1	1
c3	5	1	5	1	5	1	5	1	1	6	1	1	1	6	1	1	1
d1	1	1	1	1	5	5	5	5	1	1	1	1	6	6	6	6	1
d2	1	1	5	5	1	1	5	5	1	1	6	1	1	1	6	1	1
d3	1	5	1	5	1	5	1	5	1	1	1	6	1	1	1	6	1
h1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
h2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
h3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
s1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
s2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
s3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
Расчетные (тестовые) приращения потоков																	
z1	1																
z2	1																
z3	0																
Фактические приращения потоков																	
z1	1																
z2	1																
z3	0																

Таким образом, общее число различных случаев по сценарию 3-го уровня составляет $8+8+1=17$. Сценарии четвертого уровня (потоки, протекающие через 4 внутренние ребра фрактала на рис.1) строятся аналогичным образом. В алгоритме Triangle доказано логически, что в результате работы данного алгоритма не могут остаться никакие сценарии с путями длиной в пять ребер. Исходя из приведенной выше классификации сценариев работы алгоритма Triangle, построена таблица тестирования (табл. 1). В этой таблице веса тех ребер, которые должны остаться в сценарии третьего уровня, приняты значительно больше всех остальных (равных единице). Каждый из данных вариантов приводится либо к тридцетому, либо к последовательно-параллельному двухполосному графу, для которого несложно посчитать вручную приращение потоков между полюсами. Так, например, первый вариант приводится к тридцетому, в котором приращения потоков равны: $z_1=1; z_2=1; z_3=0$. Описанная выше методика была использована для верификации программного кода в алгоритме вычисления максимального потока в открытой трехполосной телекоммуникационной сети.

Выводы. Верификация и тестирование сложных программных алгоритмов является нетривиальной научно-инженерной задачей, которая трудно поддается автоматизации, и во многих случаях требует индивидуального подхода. В данной работе построена методика верификации программного кода в алгоритме вычисления максимального потока в телекоммуникационной сети, которая представлена открытым трехполосным взвешенным графом со свободно ориентированными ребрами.

Литература

1. Tykhonova O.V. The principles of maxflow task study for multi-pole software defined network / O.V. Tykhonova // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017. – № 2. – С. 159–163.
2. Tykhonova O.V. The maxflow problem analysis on free-oriented network graph / O.V. Tykhonova // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2018. – № 1. – С. 139–143.
3. Тихонова О.В. Оптимізація потоків у багатополосній мережі / О.В. Тихонова // Матеріали XI міжнародної науково-практичної конференції “Інтернет, Освіта, Наука” (Вінниця, 22–25 травня, 2018). – В. : ВНТУ, 2018. – С. 70–72.
4. Куликов С.С. Тестирование программного обеспечения. Базовый курс / С.С. Куликов. – 2017. – 2-е изд. – 296 с.
5. Software systems verification. Volume 4. – 2016. – Retrieved from : https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/253_cybersafetyV4/CyberSafety_V4_SSV_Guide_e.pdf.
6. Singh H. Software Reliability Testing using Monte Carlo Methods / H. Singh, P. Pal // International Journal of Computer Applications. – Nr. 4. – 2013. – P. 41–44.
7. Scenario-Based Software Architecture Evaluation Methods: An Overview / M.T. Ionita, D.K. Hammer, H.Ob bink. – Retrieved from: <http://www.win.tue.nl/oas/architecting/aimes/papers/Scenario-Based%20SWA%20Evaluation%20Methods.pdf>.

8. Hedaoo A.H. Study of Dynamic Testing Techniques / A.H. Hedaoo, A. Khandelwal // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – Vol. 7, Issue 4. – 2017. – P. 322–330.
9. Кулямин В.В. Методы верификации программного обеспечения [Электронный ресурс] / Кулямин В.В. – 2008. – Режим доступа : <http://www.ict.edu.ru/ft/005645/62322e1-st09.pdf>.
10. Jamil M. Software Testing Techniques: A Literature Review / M. Jamil, M. Arif, N. Abubakar, A. Ahmad // 2016 6th International Conference on Information and Communication Technology for The Muslim World (ICT4M). – 2016. – p. 177–182.
11. Babbar H. Software testing: techniques and test cases / H. Babbar // International journal of research in computer applications and robotics. – Vol.5, Issue 3. – 2017. – p. 44–53.
12. Paulasaari M. Tools for Code Quality in Front-end Software Development. – 2018. – Retrieved from : <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143272/Mika%20Paulasaari%20-%20IT%20Masters%20Thesis%20-%202018.pdf?sequence=1>.
13. Von Neumann J. Die Axiomatisierung der Mengenlehre / J. von Neumann // Mathematische Zeitschrift. – 1928. – № 27. – s. 669–752.

References

1. Tykhonova O.V. The principles of maxflow task study for multi-pole software defined network / O.V. Tykhonova // Measuring and Computing Devices in Technological Processes. – 2017. – N. 2. – P. 159-163.
2. Tykhonova O.V. The maxflow problem analysis on free-oriented network graph / O.V. Tykhonova // Measuring and Computing Devices in Technological Processes. – 2018. – N. 1. – P. 139-143.
3. Tykhonova O.V. Optyimizacija potokiv u baghatopoljuszij merezhi / O.V. Tykhonova // proceedings of the XI international scientific-practical conference “Internet-Education-Science” (Vinnytsia, May 22-25, 2018). – V.: VNTU, 2018. – p. 70-72.
4. Kulikov S.S. Testirovanie programmnoho obespecheniya. Bazovyy kurs / S.S. Kulikov. – 2017. – 2nd ed.. – 296 p.
5. Software systems verification. Volume 4. – 2016. – Retrieved from : https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/253_cybersafetyV4/CyberSafety_V4_SSV_Guide_e.pdf.
6. Singh H. Software Reliability Testing using Monte Carlo Methods / H. Singh, P. Pal // International Journal of Computer Applications. – Nr. 4. – 2013. – P. 41–44.
7. Scenario-Based Software Architecture Evaluation Methods: An Overview / M.T. Ionita, D.K. Hammer, H.Ob bink. – Retrieved from: <http://www.win.tue.nl/oas/architecting/aimes/papers/Scenario-Based%20SWA%20Evaluation%20Methods.pdf>.
8. Hedaoo A.H. Study of Dynamic Testing Techniques / A.H. Hedaoo, A. Khandelwal // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – Vol. 7, Issue 4. – 2017. – P. 322–330.
9. Kulyamin V.V. Metody verifikatsii programmnoho obespecheniya. – 2008. – Retrieved from: <http://www.ict.edu.ru/ft/005645/62322e1-st09.pdf>.
10. Jamil M. Software Testing Techniques: A Literature Review / M. Jamil, M. Arif, N. Abubakar, A. Ahmad // 2016 6th International Conference on Information and Communication Technology for The Muslim World (ICT4M). – 2016. – p. 177–182.
11. Babbar H. Software testing: techniques and test cases / H. Babbar // International journal of research in computer applications and robotics. – Vol.5, Issue 3. – 2017. – p. 44–53.
12. Paulasaari M. Tools for Code Quality in Front-end Software Development. – 2018. – Retrieved from : <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/143272/Mika%20Paulasaari%20-%20IT%20Masters%20Thesis%20-%202018.pdf?sequence=1>.
13. Von Neumann J. Die Axiomatisierung der Mengenlehre / J. von Neumann // Mathematische Zeitschrift. – 1928. – № 27. – s. 669–752.

Рецензія/Peer review : 9.9.2018 р. Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бондаренко О.В.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ АППРОКСИМАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ГАУССОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Рассматривается общая проблема повышения эффективности волоконно-оптических систем передачи. Проблема рассматривается с точки зрения повышения спектральной эффективности. Среди всех методов решения проблемы выбрана группа методов сигнального уплотнения. Предлагается использовать алфавиты сигналов, обладающие свойством равного увеличения длительности на стороне приема за счет материальной дисперсии. Задачи решаются для типичного случая длины регенерационных участков порядка 100-300 км. При этом рассматриваются модели узкополосных систем передачи. Случай широкополосных систем передачи рассматривается в модели «гонок» групповых скоростей. Показан конкретный вариант сигнального уплотнения волоконно-оптических систем передачи с использованием алфавитов гауссовых импульсов с амплитудной модуляцией и частотной манипуляцией. Дано доказательство теорем, обосновывающих возможность формирования вторичных алфавитов сигналов на основе первичных алфавитов, что позволяет существенно увеличить спектральную эффективность волоконно-оптических систем передачи. Дано доказательство теоремы о сжатии спектра пачки гауссовых импульсов. Обоснована принципиальная возможность повышения скорости передачи данных волоконно-оптических систем примерно в 8 раз при использовании существующих линейно-кабельных сооружений. Разработан метод синтеза моделей зависимостей различных функций коэффициента преломления от частоты и состава легирующих добавок. Показана принципиальная возможность реализации метода распознавания оптических сигналов в частотной области. Показана возможность передачи данных в сверхширокополосных волоконно-оптических системах передачи с учетом эффекта «гонок» групповых скоростей.

Ключевые слова: дисперсия, функция, сигнал, спектр, преобразование Фурье, гауссов импульс, импульс Найквиста-Котельникова, база сигнала.

N.A. ODEGOV

Odessa National O.S. Popov Academy of Telecommunications

BASICS THEORY OF APPROXIMATION OPTICAL SIGNALS BY GAUSSIAN PULSES

The general problem of increasing the efficiency of fiber-optic transmission systems is considered. The problem is considered from the point of view of increasing the spectral efficiency. Among all methods of solving the problem, a group of methods of signal multiplexing has been chosen. It is proposed to use alphabets of signals possessing the property of an equal increase in duration on the receiving side due to material dispersion. Problems are solved for a typical case of regeneration sections of the order of 100-300 km. In this case, models of narrowband transmission systems are considered. The case of broadband transmission systems is considered in the model of "racing" group velocities. The following results are announced. The parameters of the calculated pulse duration, the calculated spectral width and the calculated pulse base are introduced and justified; the proof of the minimality of the base of the Gaussian momentum is given; introduced and justified the indicator of the reduced base, which takes into account the stability of the energy spectrum of the signal to material dispersion; the proof of the minimality of the reduced base of the Gaussian momentum is given; A comparative analysis of the dispersion elongation of Gaussian pulses and Nyquist-Kotel'nikov pulses is given; a concrete variant of signal condensation of fiber-optic transmission systems with the use of Gaussian pulse alphabet with amplitude modulation and frequency manipulation is shown; the proof of theorems proving the possibility of forming secondary alphabets of signals on the basis of primary alphabets is given, which makes it possible to substantially increase the spectral efficiency of fiber-optic transmission systems; the proof of the theorem on the contraction of the spectrum of a pack of Gaussian impulses is given; substantiated the fundamental possibility of increasing the data transmission speed of fiber-optic systems by approximately 8 times using existing linear-cable facilities; A method has been developed for synthesizing the models of the dependences of various functions of the refractive index on the frequency and composition of alloying additives; the possibility of realizing the method of recognizing optical signals in the frequency domain is shown in principle; The possibility of data transmission in ultra-wideband fiber-optic transmission systems is shown with allowance for the effect of "racing" group velocities.

Keywords: dispersion, function, signal, spectrum, Fourier transform, Gaussian pulse, Nyquist-Kotel'nikov pulse, signal base.

Введение

Часть результатов, имеющих отношение к предмету настоящей работы, опубликована ранее в статьях автора и его коллег. Эти работы цитируются по тексту. В данной статье дается обобщение и систематизация ранее опубликованных результатов, а также их дополнение по необходимости.

Целью статьи является обоснование теоретической возможности сигнального уплотнения волоконно-оптических систем передачи с использованием алфавита импульсов гауссовой формы.

1. Проблема повышения производительности телекоммуникационных сетей

Некоторый производственный опыт автора и личный опыт в качестве абонента говорит о том, что в настоящее время телекоммуникационные сети украинских операторов функционируют в сбалансированном режиме. Под этим понимается, что если рассматривать передачу трафика от конечного абонента до интересующего его информационного ресурса где-то там, на другом краю земли, то:

- абонент, в принципе, может получить доступ к ближайшему порту оператора за более-менее умеренную плату практически на всей территории Украины;
- точки агрегации трафика операторов на уровне микрорайонов, поселков городского типа и сел способны с достаточной скоростью решать задачу маршрутизации и передачи трафика на более высокие уровни;

- главные узлы операторов включены в региональные сети передачи данных каналами с приемлемой скоростью;
- узлы поставщиков международного трафика подключены к национальным точкам обмена трафиком на достаточно высокой скорости;
- трансконтинентальные каналы передачи данных между точками обмена международным трафиком обеспечивают приемлемую пропускную способность.

Выше дана не количественная, а исключительно качественная картина. Все там условно. Но даже и это равновесие лучше понимать как временное, сиюминутное. Имеется много оценок динамики увеличения информации в сетях. Иногда считается, что до 2020 года количество информации в мире будет увеличиваться вдвое каждые 2 года [1]. В других источниках дается оценка ежегодного приращения объема информации 30% [2]. В любом случае к данным оценкам надо относиться с должным чувством юмора. Все-таки «информация», хоть в понимании Н. Винера, хоть в понимании К. Шеннона [3] должна соотноситься с уменьшением некоторой начальной неопределенности. Трудно предположить, что со времени изобретения колеса, рычага и памперсов человечество поумнело в 20 или, допустим, в 200 раз. Количественные оценки содержательности информации вряд ли станут предметом серьезной научной теории: индивидуально все это, размыто и не формализуемо, если разобраться. А вот по сети Internet транслируется все подряд: и мусор всякий информационный, и личная переписка, и управление интернет-вещами, и редкие-редкие великие идеи...

С другой стороны, общий объем передаваемого трафика оценить довольно легко, равно как и прогнозировать его динамику. Например, для одной из международной точек обмена трафиком [4] (AMS-IX: Amsterdam Internet Exchange) приведем графики нагрузки (рис. 1). Количественные характеристики из приведенных графиков вывести трудно, однако можно сделать общий вывод: на протяжении всего одного года как запросный трафик (up-link), так и ответный трафик (down-link) возрастают.

Таким образом, нетрудно сделать прогноз: неизбежно настанет момент времени, когда потребуется осуществить модернизацию сетей передачи данных. Какие сегменты сети окажутся наиболее уязвимыми вследствие возрастания объемов трафика?

Представляется, что на уровне абонентских окончаний в ближайшее время принципиальных проблем не возникнет. Мобильные технологии радиодоступа (WiFi, CDMA, 3G, 4G) доставляют относительно недорогую и быстро реализуемую услугу. Проводные технологии типа FTTP в городских районах с плотной застройкой позволяют доставлять абоненту порт Gigabit Ethernet за весьма умеренную плату. В селах наибольшую эффективность по критерию цена/качество дает технология пассивных оптических сетей (PON), позволяющая экономить наиболее дорогой ресурс – оптические волокна (ОВ) кабеля.

Monthly graph

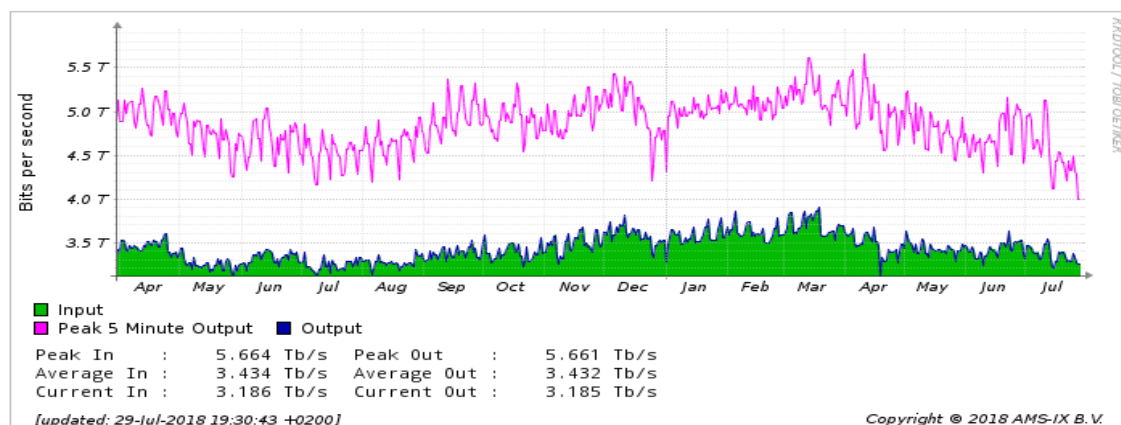


Рис. 1. Трафик на международном узле обмена в Амстердаме

На самом верхнем уровне телекоммуникационных сетей (международные точки обмена трафиком и трансконтинентальные каналы передачи данных) проблема повышения производительности представляется неисчерпаемо актуальной. Решение проблемы в некоторой степени упрощается тем, что таких узлов и таких каналов во всем мире насчитываются единицы. Для верхнего уровня, таким образом, применимы любые решения, включая и весьма дорогостоящие. Даже прокладка нового кабеля по дну океанов с характеристиками, позволяющими увеличить пропускную способность волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) может оказаться оправданной. Иными словами, на решение данной проблемы нам не следует жалеть никаких не наших денег.

Иная ситуация на «среднем уровне», который включает точки агрегации трафика на главных или региональных узлах операторов, каналы опорной сети, включая междугородние каналы. Данный уровень весьма уязвим с точки зрения обеспечения необходимой производительности при резком увеличении суммарного трафика. В то же время, на данном уровне не все возможные решения представляются одинаково эффективными. В самом общем плане есть только два пути повышения пропускной способности ВОСП: замена линейно-кабельных сооружений (ЛКС) с лучшими характеристиками по затуханию и по

дисперсии и замена оконечного активного оборудования более производительным. Первый из этих путей намного дороже второго.

Приведем пример. Пусть на регенерационном участке длиной порядка 100 км необходимо повысить пропускную способность существующей ВОСП. Для определенности положим, что в данный момент в качестве оконечного оборудования используются мультиплексоры FMUX04E [5] (синхронные каналы 4xE1, асинхронные каналы 3x100 Мбит/с Ethernet). Для увеличения пропускной способности ВОСП модернизируем узлы передачи и вместо используемых на данный момент мультиплексоров установим более мощное оборудование, например мультиплексоры FMUX101 (синхронные каналы 16xE1, асинхронные каналы 1000 Мбит/с Ethernet). При этом стоимость одного FMUX04E без SFP-модулей составляет \$635, а стоимость одного FMUX101 также без SFP-модулей – \$1195. Иначе говоря, с учетом остаточной стоимости выводимого из эксплуатации оборудования, повышение пропускной способности ВОСП приблизительно в 4 раза обойдется приблизительно в \$1000. Теперь решим ту же задачу, предполагая, что увеличения производительности ВОСП можно достичь заменой оптического кабеля. Стоимость строительства ЛКС в зависимости от способа прокладки (под землей, на опорах ЛЭП), сложности получения разрешений, стоимости проекта и монтажных работ составит примерно \$3...\$10 за погонный метр. В среднем стройка обойдется где-то \$500000. Итак, замена активного оборудования на порядка дешевле.

Подведем итог. Общую проблему повышения производительности ВОСП мы далее будем рассматривать применительно к сегменту опорных сетей национальных и региональных операторов. При этом будем считать, что длина регенерационных участков (РУ) имеет порядок 100-300 км. Также принципиально будем рассматривать только те группы методов, которые (теоретически!) позволяют повысить пропускную способность ВОСП за счет модернизации каналаобразующего оборудования при использовании *существующих* ЛКС.

2. Показатели эффективности волоконно-оптических систем передачи

На этапах модернизации (реконструкции) реальных ВОСП на первый план естественным образом выходят технико-экономические показатели. К ним можно отнести удельные показатели скорости передачи данных в расчете на единицу стоимости закупки, монтажа и эксплуатации оборудования, а также различные показатели эксплуатационной надежности. Здесь оператор руководствуется информацией об уже выведенном на рынок оборудовании.

Данная статья носит теоретический характер. В этом контексте нас будут интересовать показатели потенциальной пропускной способности и критериев спектральной и энергетической эффективности. Что касается первого из них, то в ряде случаев повысить пропускную способность ВОСП можно тривиально: при наличии свободных ОВ поставить в параллель несколько каналаобразующих устройств. При этом, очевидно, спектральная эффективность не улучшится, а показатели экономической и энергетической эффективности точно ухудшатся.

Показатели спектральной и энергетической эффективности зачастую рассматриваются совместно (например, [6, 7]). В данной работе спектральная эффективность принимается в качестве ведущего показателя, а энергетическая эффективность – в качестве вспомогательного показателя.

С учетом особенностей решаемых задач применительно к ВОСП для сравнительной оценки спектральной эффективности будем применять *линейный показатель спектральной эффективности* (ЛПСЭ), который определим:

$$SpL = \frac{Br[\text{бум}/\text{с}]}{\Delta F[\text{Гц}]} \frac{L[\text{км}]}{100[\text{км}]}, \quad (1)$$

где $Br[\text{бум}/\text{с}]$ – достигнутая для данной системы скорость передачи; $\Delta F[\text{Гц}]$ – используемая (или потенциально доступная для использования) полоса частот для данной системы передачи; $L[\text{км}]$ – расстояние, на котором зафиксированы конкретные значения Br для данной системы передачи. База по длине 100 км здесь берется именно такой применительно к уточненной практической задаче, для которой выше оговорен порядок длин РУ: 100–300 км.

В качестве базы сравнения приведем значение ЛПСЭ для одной из радио технологий: в системах мобильной связи спектральная эффективность имеет типичные значения от 5 до 10 единиц [8] для технологии LTE (Long Term Evolution). При этом речь идет о полосе частот канала передачи порядка 20 МГц и о расстоянии порядка единиц – десятков километров. Принимая условно расстояние передачи 50 км, получим значение показателя (1) порядка 5 единиц.

Имеются сведения об опытных ВОСП, способных передавать данные на расстояние около 7000 км со скоростью 20 Тбит/с [9]. Другим известным автору рекордом является передача данных на расстояние порядка 1000 км со скоростью 159 Тбит/с [10]. Учтем, что доступный диапазон длин волн занимает промежуток примерно от 800 нм до 1800 нм, чему соответствует полоса частот приблизительно от 175 ТГц до 375 ТГц. Общая полоса частот для передачи оптических сигналов составляет при этом примерно 200 ТГц. Таким образом, для первой из названных ВОСП ЛПСЭ составляет приблизительно 7 единиц, а для второй 8 единиц. Эти значения сравнимы с ЛПСЭ для LTE. К сожалению, в промышленности связи такие решения не нашли применения. Кроме того, их применение требует принципиально иного ОВ. Выше мы приняли установку: выбирать методы повышения эффективности ВОСП без модернизации существующих ЛКС. Что же касается наивысшей скорости по источнику [10], то одним из приемов повышения ЛПСЭ в этом случае

является использование квадратурно-амплитудной модуляции, конкретно QAM-16. Показано [11], что использование фазовой модуляции в ВОСП требует прецизионной синхронизации, едва ли достижимой при эксплуатации промышленных ВОСП. Этому аспекту мы уделим внимание ниже.

В реально используемых ВОСП значения ЛПСЭ оказываются намного более скромными. Так, для STM-256 линейная скорость передачи составляет 40 Гбит/с в частотном канале шириной 50 ГГц на расстоянии порядка 50 км [12]. Значение ЛПСЭ соответственно 0,4 единицы. Если же за базу взять общую полосу 200 ТГц, то значение ЛПСЭ окажется ничтожно малым. Более корректно рассмотреть частотный план по рекомендациям ITU-T, который вблизи окна прозрачности 1550 нм рекомендует использовать 41 частотный канал шириной 100 ГГц или, соответственно 81 канал шириной 50 ГГц. Тогда значение ЛПСЭ в отнесении к полосе 200 ТГц составит всего 0,008 единицы. Использование решений типа DWDM (по существу, использование нескольких окон прозрачности) принципиально не решает проблемы эффективного использования всей доступной полосы частот в оптическом диапазоне.

О каких теоретически возможных значениях ЛПСЭ может идти речь? Приведем пример весьма грубой модели. Пусть диапазон шириной 200 ТГц разделен на узкополосные частотные каналы шириной 50 ГГц, что дает 4000 каналов. Допустим, что значение коэффициента погонной дисперсии составляет некоторую единую для всех каналов величину порядка 10 пс/(нм·км) (практически это, разумеется, не так: здесь мы учли типичные паспортные значения данного показателя от 3 пс/(нм·км) до 20 пс/(нм·км) [13] и взяли нечто среднее). Положим, что начальная длительность импульсов пренебрежимо мала по сравнению с их удлинением вследствие дисперсии в ОВ, а на стороне приема импульсы селекционируются идеально. И, наконец, положим, что информация передается простейшим бинарным алфавитом сигналов. В такой модели межимпульсный интервал в каждом канале составит 1000 пс, скорость передачи данных в каждом канале будет 1 Гбит/с, а суммарное значение ЛПСЭ будет 0,02 единицы в расчете на 200 ТГц полосы.

Полученное значение ЛПСЭ примерно вдвое больше, чем значение этого показателя для STM-256. При этом мы ничего не сказали о том, какую полосу занимает импульс, несущий информацию. Сильно упрощая реальную ситуацию, предположим, что в общей частотной полосе организовано M узкополосных частотных каналов, а импульсные сигналы имеют общий для всех каналов вид:

$$u(t) = U(t) \exp(j\omega_m t), \quad m = 1 \dots M, \quad (2)$$

где $U(t)$ – низкочастотная составляющая (НЧС) сигнала; ω_m – несущая (центральная) частота m – го канала. Обозначения ω и Ω здесь и далее применяются для угловой частоты, а обозначения $f = \omega/2\pi$ и $F = \Omega/2\pi$ – для циклической частоты. В такой модели максимальная скорость передачи будет определяться:

$$Br_{\max} = M \frac{1}{\Delta T}, \quad M = \frac{\Delta F_{\Sigma}}{\Delta F_1}, \quad (3)$$

где ΔT – длительность НЧС импульса; ΔF_{Σ} – общая ширина полосы для частотных всех каналов; ΔF_1 – ширина полосы каждого из частотных каналов. Положим, что ширина каждого из частотных каналов выбрана таким образом, чтобы в точности соответствовать ширине спектра НЧС импульса (2). Тогда из (3) с очевидностью следует, что оптимальным для данной модели будет сигнал с минимальной базой, чему соответствует критерий оптимальности:

$$\Delta B = \Delta T \cdot \Delta F_1 \rightarrow \min. \quad (4)$$

С учетом особенностей искажения сигналов в ВОСП критерий (4) нуждается в уточнении. При некоторых предположениях можно считать, что энергетический спектр сигнала в ВОСП слабо деформируется по мере распространения сигнала вдоль ОВ [14, 15]. Точнее, форма энергетического спектра остается практически неизменной, тогда как амплитуда понятным образом уменьшается в соответствии с коэффициентом затухания. То есть, ширину спектра сигнала можно считать приблизительно одинаковой на стороне передачи и на стороне приема. Совершенно иная ситуация с длительностью импульса. Принципиально важно учитывать ее увеличение по мере распространения сигнала вдоль ОВ. Поэтому здесь мы будем использовать показатель *приведенной* базы импульса и соответствующий ему критерий:

$$\Delta B(L) = \Delta T(z=L) \cdot \Delta F_1(z=0) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где z – расстояние, пройденное импульсом вдоль ОВ; L – длина РУ.

Итак, показатель ЛПСЭ (1) будем применять для сравнительной оценки эффективности ВОСП, а критерий (5) – для сравнительной оценки теоретических сигналов.

3. Методы повышения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи

Тема классификации методов данной группы рассматривается во многих работах, включая монографии. Здесь конспективно отметим лишь некоторые моменты.

Среди методов повышения пропускной способности ВОСП обычно рассматриваются [16]:

- метод временного уплотнения (TDM);
- метод частотного уплотнения (FDM);
- метод модового уплотнения (MDM);

- метод уплотнения по поляризации (PDM);
- метод многоволнового уплотнения оптических несущих (WDM).

Специфическими для ВОСП из названной группы методов можно считать MDM, PDM и WDM.

Относительно слабо исследованной остается группа методов сигнального уплотнения, когда повышение пропускной способности достигается использованием алфавита сигналов определенной структуры [16,17]. В частности, в [16] рассмотрен метод полярного разделения сигналов, причем поляриность кодируется разной формой НЧС, а в [17] – сигнализация в виде импульсов Найквиста.

Отдельную группу методов повышения пропускной способности ВОСП составляют способы компенсации или уменьшения дисперсии [18], которая является в данном аспекте решающим фактором ограничения скорости передачи. Алфавиты сигналов, обладающих определенными оптимальными свойствами, с учетом дисперсии рассмотрены в статье [19]. Ни в коей мере не ставя под сомнение ценность разработок различных методов повышения производительности ВОСП, основное внимание уделим группе методов сигнального уплотнения с учетом дисперсионных явлений в ОВ.

4. Обоснование дисперсионной модели

Исчерпывающей моделью преобразований сигналов в ОВ являются уравнения поля, включая уравнения Максвелла [13]. В общем виде здесь эту модель не имеет смысла рассматривать, поэтому перейдем сразу к зависимостям, следующим как частный случай из этой теоретической модели.

Рассмотрим близкую к определенным условиям практической ситуации систему допущений:

- полагаем, что сигнал на входе ОВ имеет приблизительно круговую поляризацию;
- сигнал на входе в ОВ относительно слаб, что позволяет считать нелинейные эффекты типа четырехволнового смешения [20] или фазовой самомодуляции [21] пренебрежимо малыми;
- профиль ОВ по коэффициенту преломления строго ступенчатый;
- оптическое волокно функционирует в одномодовом режиме;
- материал сердцевины ОВ можно считать изотропной средой;
- зависимость коэффициента затухания по частоте в рассматриваемом узком диапазоне можно считать постоянной функцией.

Данные предположения сводят весьма сложную задачу исследования влияния различных видов дисперсии к исследованию влияния собственно материальной дисперсии в сердцевине ОВ на форму оптического сигнала.

В этих предположениях хорошей моделью для узкополосного сигнала с НЧС $U(t, z)$ и несущей частотой ω_0 является решение волнового уравнения

$$u(t, z) = U(t, z)e^{j\omega_0 t} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) e^{j\varphi(\omega, t, z)} d\omega, \quad (6)$$

в котором фазу $j\varphi(\omega, t, z)$ мы сразу запишем в нескольких удобных для последующего анализа эквивалентных формах:

$$j\varphi(\omega, t, z) = j[\omega t - k(\omega)z] = j[\omega t - \frac{\omega n(\omega)}{c} z] = j[\omega t - \omega n(\omega)\tau], \quad (7)$$

где $k(\omega)$ – зависимость волнового числа от частоты; z – расстояние, пройденное сигналом вдоль ОВ; $n(\omega)$ – зависимость коэффициента преломления от частоты; c – скорость света в вакууме; τ – «универсальное время» – время, за которое сигнал проходит расстояние z в вакууме.

Если в выражениях (6,7) положить $z = 0$ (точка ввода сигнала в ОВ), то получится, что:

$$u(t, z = 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (8)$$

Выражение (8) по форме является обратным преобразованием Фурье, тогда функция $g(\omega)$ – спектральная плотность сигнала в момент ввода в ОВ.

Для дальнейшего изложения примем формальные обозначения: $r(x)$ – зависимость некоторого параметра r от другого параметра x (функция); $r^{[m]}(x)$ – производная данной функции порядка m по переменной x (тоже функция); $r_{x_0}^{[m]}$ – значение производной функции $r(x)$ порядка m при некотором определенном значении аргумента x_0 (уже не функция, а конкретное число, возможно комплексное).

Для узкополосного сигнала (6) представим фазу (7) частичной суммой разложения в ряд Тейлора в малой окрестности несущей частоты ω_0 :

$$j\varphi(\omega, t, z) \approx j\Omega t + j\omega_0 t - jk(\omega_0)z - jk_{\omega_0}^{[1]}z\Omega - jz \sum_{m=2}^M \frac{1}{m!} k_{\omega_0}^{[m]} \Omega^m, \quad \Omega = \omega - \omega_0, \quad \omega = \Omega + \omega_0, \quad (9)$$

где Ω – небольшая девиация частоты относительно несущей частоты ω_0 ; M – высший порядок учитываемых производных в данной частичной сумме.

Дисперсионная модель (6,7), равно как и представление фазы в линеаризованном виде (9) известны. Однако трактовка этих выражений оказывается разной. Так, в [14] данная модель трактуется с точки зрения анализа физических процессов в ОБ, а в [22] те же формулы рассматриваются как исходные выражения для инженерных расчетов. Здесь мы расставим определенные акценты с точки зрения теории сигналов [23]. Для этого рассмотрим по отдельности компоненты фазы (9) и соответствующие фазовые множители.

Умножим левую и правую части уравнения (6) на $\exp(-j\omega_0 t)$ и выполним линейную замену переменной интегрирования $\Omega = \omega - \omega_0$. Эти операции означают демодуляцию сигнала по частоте, тогда:

$$U(t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) \exp\left(j\Omega t - jk(\omega_0)z - jk_{\omega_0}^{[1]}z\Omega - jz \sum_{m=2}^M \frac{1}{m!} k_{\omega_0}^{[m]} \Omega^m\right) d\Omega, \quad (10)$$

где $G(\Omega) = g(\omega - \omega_0)$ – спектральная плотность НЧС сигнала в момент ввода в ОБ.

Далее нас будет интересовать форма НЧС сигнала. Данное понятие применительно к решаемой задаче нуждается в уточнении. В строгом смысле форма комплексного сигнала определяется его вещественной и мнимой частью. Применительно к оптическим сигналам такое разделение представляется ненаблюдаемым. Причина – малая длительность импульсов и быстрая деформация фазового спектра по мере распространения сигнала вдоль ОБ. Поэтому в теоретическом плане под формой сигнала будем понимать характеристики распределения энергии во временной или в частотной области. То есть, основными характеристиками формы являются функции $U^2(t, z)$ и $G^2(\Omega)$ – энергетическая функция во временной области и, соответственно, энергетический спектр. Также в качестве характеристик формы будем рассматривать соответствующие линейные образы $|U(t, z)|$ – модуль сигнала и $|G(\Omega)|$ – модуль спектральной плотности. При этом за условный ноль аргументов этих функций будем принимать энергетический центр сигнала.

С этими уточнениями преобразуем уравнение (10). Сначала воспользуемся теоремой запаздывания [23]:

$$U(t - t_0, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) \exp\left(j\Omega t - jk(\omega_0)z - jz \sum_{m=2}^M \frac{1}{m!} k_{\omega_0}^{[m]} \Omega^m\right) d\Omega, \quad t_0 = k_{\omega_0}^{[1]}z. \quad (11)$$

В силу соотношений (7) запаздывание t_0 можно представить в эквивалентной форме

$$t_0 = \frac{z}{c} [n(\omega_0) + \omega_0 n_{\omega_0}^{[1]}].$$

Учтем, что групповая скорость в среде в малой окрестности несущей частоты выражается:

$$V_{gr} = \frac{c}{n(\omega_0) + \omega_0 n_{\omega_0}^{[1]}}, \quad \text{откуда } t_0 = \frac{z}{V_{gr}}. \quad \text{То есть, запаздывание } t_0 \text{ можно трактовать как перенос}$$

энергетического центра сигнала на расстояние z со скоростью V_{gr} . В нашем определении данное смещение на форму НЧС сигнала не влияет, поэтому дальше этот параметр приравняем нулю. Выполним еще одно тождественное преобразование уравнения (11), умножив обе его части на фазовый коэффициент с показателем $jk(\omega_0)z$:

$$\exp[jk(\omega_0)z]U(t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) \exp\left(j\Omega t - jz \sum_{m=2}^M \frac{1}{m!} k_{\omega_0}^{[m]} \Omega^m\right) d\Omega. \quad (12)$$

В уравнении (12) фазовый коэффициент $\exp[jk(\omega_0)z]$ не влияет на форму сигнала в оговоренном выше смысле. В самом деле:

$$\{\exp[jk(\omega_0)z]U(t, z)\}^2 = \exp[jk(\omega_0)z]U(t, z) \cdot \exp[-jk(\omega_0)z]U(t, z) = U^2(t, z). \quad (13)$$

С учетом тождества (13) для исследования формы НЧС сигнала далее принимается модель:

$$U(t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) \exp\left(j\Omega t - jz \sum_{m=2}^M \frac{1}{m!} k_{\omega_0}^{[m]} \Omega^m\right) d\Omega. \quad (14)$$

Совершенно иначе приходится учитывать множитель $\exp[jk(\omega_0)z]$ при анализе фазовых характеристик. Дадим приближенную оценку расстояния, на котором данный коэффициент приведет к смене «полярности» всех гармонических составляющих сигнала на противоположные. Для этого решим уравнение $k(\omega_0)z = \pi$ относительно z . С учетом тождеств (7) получим решение в виде:

$$z = \frac{\pi \cdot c}{\omega_0 \cdot n(\omega_0)}. \quad (15)$$

Подставим в уравнение (15) конкретные числовые значения. Значение несущей примем $\omega_0 = 2\pi \cdot 200 \text{ THz}$, а значение показателя преломления будем считать для упрощения расчетов равным 1,5 (на самом деле оно ближе к 1,4, но здесь нам важны порядки). Тогда:

$$z \approx \frac{\pi \cdot 3 \cdot 10^8 [\text{m} / \text{ns}]}{1,5 \cdot 2\pi \cdot 200 \cdot 10^{12} [\text{ns}^{-1}]} = 0,5 \cdot 10^{-6} [\text{ns}] = 0,5 [\text{ps}]. \quad (16)$$

Полученное значение требует с особой осторожностью относиться к теоретическим методам уплотнения ВОСП, основанным на фазовой модуляции, включая QAM-4, не говоря уже о QAM-16. Также представляются практически нереализуемыми методы, требующие высокой точности синхронизации. Положим, что некоторый метод требует регистрации фазы с не очень большой точностью порядка $2\pi/100 [\text{rad}]$. Тогда из выражений типа (16) нетрудно определить, что точность синхронизации по времени должна иметь в относительных единицах порядок $10^{-16} - 10^{-17}$. Для сравнения: стабильность атомных часов имеет порядок $10^{-14} - 10^{-15}$ [24]. С точки зрения задач эксплуатации ВОСП полученные результаты означают, что достаточно слегка задеть патчкорд, чтобы эффективно решить задачу срыва синхронизации. Видимо, с учетом подобных соображений автором [16] предложен метод «полярного» (не поляризационного!) уплотнения ВОСП. При этом «положительная» и «отрицательная» полярность кодируются, по сути, принципиально разными формами НЧС в принятом выше понимании этого термина.

Негативное отношение автора к фазовым методам ни в коей мере не распространяется на способы уплотнения за счет поляризационного мультиплексирования. Исследования в этом направлении (например, [25]) представляются весьма перспективными. Не отрицая ценности таких исследований, мы здесь сосредоточимся на группе методов, названных выше методами сигнального уплотнения.

Основная модель дисперсионной эволюции (14) позволяет конкретизировать такие понятия, как «узкополосный сигнал» или «широкополосный сигнал». В [14] учет производных фазы в данном уравнении не выше второго порядка получил название «дисперсии групповых скоростей», а учет производных более высоких порядков – «дисперсией высших порядков».

С точки зрения решаемой прикладной задачи удобно считать, что:

- если с достаточной в конкретной задаче точностью можно ограничиться случаем «дисперсии групповых скоростей», то такой сигнал будем считать узкополосным;
- если решаемая задача требует учета производных фазы до более высоких разумных порядков (до 3-го или до 5-го) то будем говорить о широкополосном сигнале;
- если сама по себе линеаризация (9) теряет какой бы то ни было прикладной смысл, то в такой ситуации будем говорить о сверхширокополосных системах (не сигналах!) передачи.

Выполненные оценки точности моделей позволяют дать оценки ширины полос. Так сигнал в полосе 50-100 ГГц может считаться узкополосным с высокой точностью [11]. Это хорошо согласуется с шагом сетки частот по рекомендациям ITU-T [12]. В полосах частот порядка 200-300 ГГц следует использовать модель широкополосного сигнала (модель «дисперсии высших порядков») [26]. Для более широких полос модель (14) неприменима. Здесь логично использовать технологии FDM и WDM в комплексе с учетом существенной разницы групповых скоростей для сильно разнесенных по частоте несущих [27].

5. Характеристики длительности и ширины спектра оптических сигналов

Поскольку теоретические сигналы не являются одновременно финитными во временной и в частотной области [28], для анализа показателей (4,5) по необходимости приходится использовать некоторые искусственные характеристики длительности и ширины спектра. Главное, чтобы такие характеристики соответствовали принятому способу детектирования и распознавания сигналов на стороне приема. Также такие характеристики должны позволять выполнение сравнительного анализа оптимальности сигналов альтернативной структуры по заданным критериям.

Применительно к бинарному кодированию (0 – нет импульса, 1 – есть импульс в тактовом интервале) и пороговому способу детектирования сигналов простая теоретическая характеристика «длительности импульса на половине высоты» [13] может считаться приемлемой. При использовании сигнальных алфавитов более сложной структуры [19] такая характеристика теряет смысл. На рис. 2 – рис. 6 для наглядности представлены результаты динамического моделирования эволюций формы сигналов, полученные с помощью программы Dispersion. Программа разработана автором и реализована на платформе Free Pascal. Модель реализует случай дисперсии групповых скоростей. Для сравнения на данных рисунках даны результаты моделирования в частном случае: начальная длительность импульсов разной формы приблизительно одинакова, несущая частота соответствует длине волны 850 нм, сердцевина ОВ всюду составлена из чистого кварца (SiO₂), полоса частот занимает примерно интервал 100 ГГц. Центр графиков приведен к условному нулю соответствующего аргумента. Заметим, что выбор других параметров моделирования не сильно влияет на качественную картину.

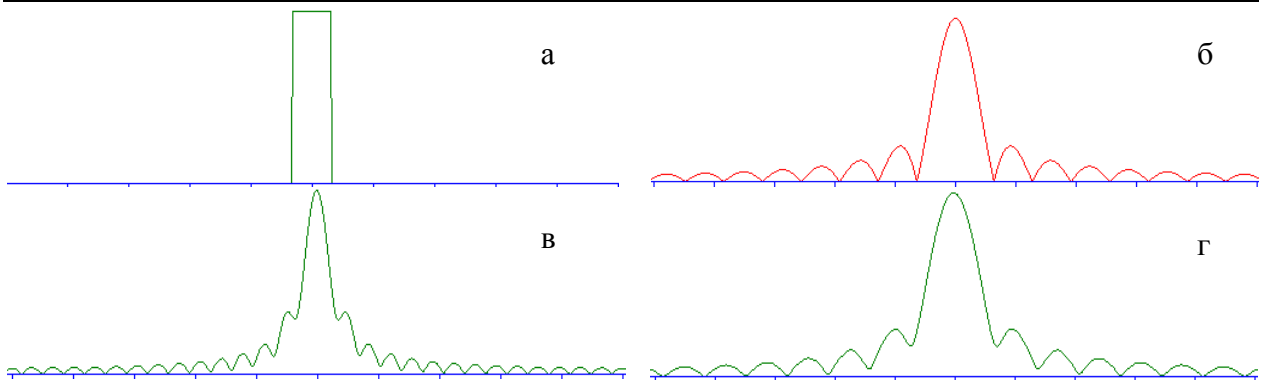


Рис. 2. Дисперсионная эволюция прямоугольного импульса:

а – начальная форма импульса; б – модуль спектральной плотности; в – форма импульса (модуль сигнала) на расстоянии 25 км; г – форма импульса на расстоянии 50 км

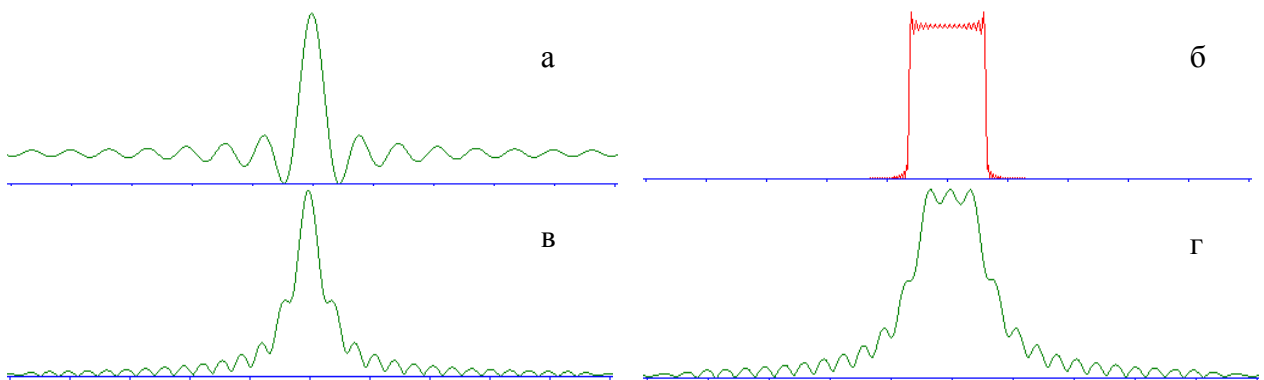


Рис. 3. Дисперсионная эволюция импульса Найквиста-Котельникова:

а – начальная форма импульса; б – модуль спектральной плотности; в – форма импульса (модуль сигнала) на расстоянии 25 км; г – форма импульса на расстоянии 50 км

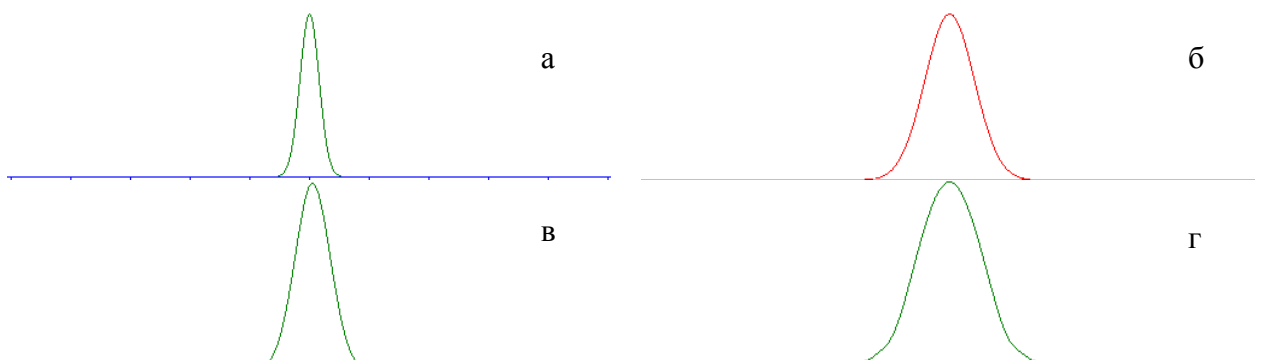


Рис. 4. Дисперсионная эволюция гауссова импульса:

а – начальная форма импульса; б – модуль спектральной плотности; в – форма импульса (модуль сигнала) на расстоянии 25 км; г – форма импульса на расстоянии 50 км

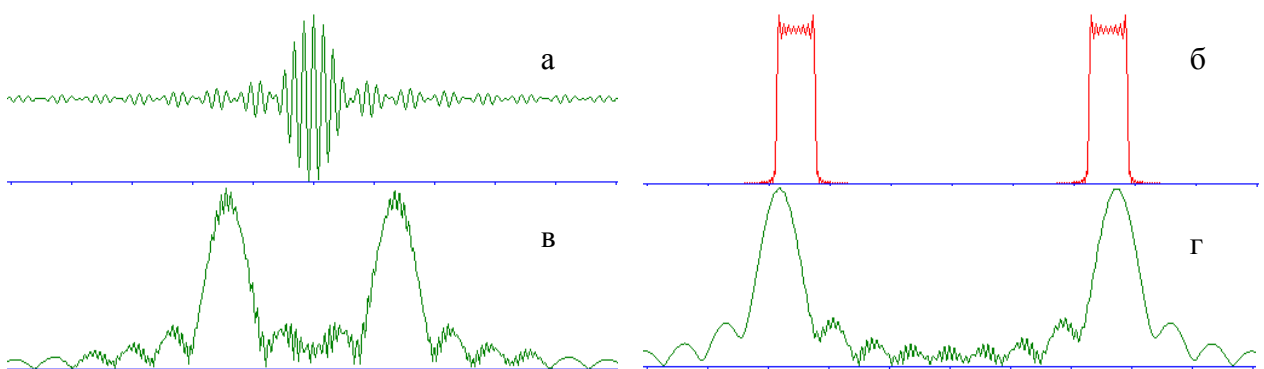


Рис. 5. Дисперсионная эволюция BS-импульса:

а – начальная форма импульса; б – модуль спектральной плотности; в – форма импульса (модуль сигнала) на расстоянии 25 км; г – форма импульса на расстоянии 50 км

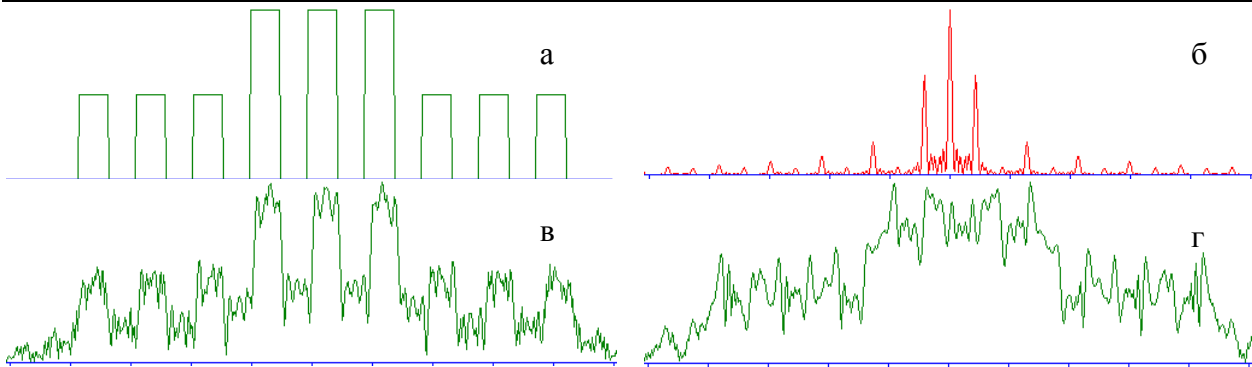


Рис. 6. Дисперсионная эволюция пачки прямоугольных импульсов:

а – начальная форма последовательности; б – модуль спектральной плотности; в – форма сигнала (модуль сигнала) на расстоянии 25 км; г – форма сигнала на расстоянии 50 км

Анализ графиков на рис. 2 – рис. 6 позволяет сделать ряд качественных выводов:

- все импульсы имеют тенденцию к удлинению;
- из приведенных вариантов теоретических сигналов в наименьшей степени изменяется форма гауссова импульса;
- модуль спектральной плотности оказывается устойчивой характеристикой сигнала;
- чем ближе сосредоточен спектр в окрестности «нуля» частот, тем меньше импульс подвержен искажению за счет дисперсии;
- наихудший вариант дает BS-импульс [29] (импульс с «плохим» спектром, где значительная часть энергии сосредоточивается на краях выбранной частотной полосы).

Показателен случай, представленный на рис. 6. Здесь пачка прямоугольных импульсов моделирует сигнал «три точки, три тире, три точки» (сигнал SOS в азбуке Морзе). Здесь, наряду с дисперсионной эволюцией отдельных импульсов, наблюдается межимпульсная интерференция. В итоге сигнал деформируется настолько, что трудно представить метод распознавания во временной области.

Главный вывод из рассмотрения данных графиков: требуются некоторые универсальные для всех приведенных вариантов сигналов характеристики их длительности и ширины спектра, не зависящие от их начальной формы.

В качестве таких характеристик сигнала $u(t)$ применяются [23, 30] эффективная длительность:

$$\Delta T_{eff}^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 u^2(t) dt, \quad E = \int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt, \quad (17)$$

где E – суммарная энергия сигнала, а также эффективная ширина спектра:

$$\Delta \Omega_{eff}^2 = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 g^2(\omega) d\omega, \quad g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (18)$$

Выражения (18) дают характеристику ширины спектра в единицах угловой частоты (рад/с). В единицах циклической частоты (Гц) эффективная ширина спектра будет:

$$\Delta F_{eff}^2 = \frac{1}{4\pi^2} \Delta \Omega_{eff}^2. \quad (19)$$

Соответственно, из выражений (17-19) следуют два определения эффективной базы сигнала:

$$a) \quad \Delta B_{\Omega}^2(u) = \Delta T_{eff}^2 \cdot \Delta \Omega_{eff}^2 \quad b) \quad \Delta B_F^2(u) = \Delta T_{eff}^2 \cdot \Delta F_{eff}^2. \quad (20)$$

С точки зрения решения задач оптимизации по критериям (4,5) оба определения (20 а) и (20 б) оказываются эквивалентными. Докажем даже более общее предложение, которое понадобится далее.

Лемма эквивалентности. Если функция $y^*(x)$ доставляет минимум неотрицательному на множестве вещественных чисел функционалу $\Phi(y)$, то она также доставляет минимум функционалу $\alpha \cdot \Phi^{\beta}(y)$, где α и β – положительные числа. Доказательство данной леммы элементарно следует из свойств алгебры вещественных чисел.

В самом деле, из условий леммы следует, что функция $y^*(x)$ обладает тем свойством, что $\Phi(y^*) \leq \Phi(y)$, где $y(x)$ – любая другая, отличная от $y^*(x)$, функция. Поскольку функционал $\Phi(y)$ принимает неотрицательные значения для любой функции y , то знак приведенного неравенства не изменится, если правую и левую его части (суть – неотрицательные числа) возвести в одинаковую степень, то есть $\Phi^{\beta}(y^*) \leq \Phi^{\beta}(y)$. Также смысл неравенства не изменит умножение его правой и левой части на

некоторое неотрицательное число, откуда: $\alpha \cdot \Phi^\beta(y^*) \leq \alpha \cdot \Phi^\beta(y)$, что и требовалось доказать.

Адекватности характеристик (17-19) даются разные «интуитивные» обоснования. Так, в [23] они выводятся из аналогий с моделями теоретической механики. Приведем более продуктивную аналогию с теоретико-вероятностными представлениями. В качестве примера рассмотрим интерпретации, связанные с показателем (17) и рассмотрим функцию:

$$p(t) = \frac{1}{E} u^2(t), \quad (21)$$

где в условиях решаемой задачи функцию $u^2(t)$ можно понимать как зависимость мощности от времени, а саму функцию $p(t)$ – как нормированную функцию распределения энергии сигнала во временной области. С учетом определения суммарной энергии сигнала в выражениях (17), нетрудно видеть, что:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(t) dt = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt = \frac{E}{E} = 1. \quad (22)$$

Также очевидно, что функция $p(t)$ всюду неотрицательна. С учетом класса рассматриваемых теоретических сигналов, данную функцию можно считать также кусочно-непрерывной. Таким образом, по своим формальным математическим свойствам функция $p(t)$ ничем не отличается от теоретико-вероятностной плотности распределения вероятности [31]. Установим некоторое соответствие математических форм и предметных понятий. Так, момент первого порядка

$$\int_{-\infty}^{\infty} tp(t) dt = M_p \quad (23)$$

на языке теории вероятностей называется «математическим ожиданием», а в нашем понимании – энергетическим центром импульса во временной области, относительно которого мы договорились, что $M_p = 0$. Второй центральный момент

$$\int_{-\infty}^{\infty} (t - M_p)^2 p(t) dt = D_p \quad (24)$$

называется «дисперсией» (далее, чтобы не путать с дисперсией в ОВ будем называть его теоретико-вероятностной дисперсией, сокращенно – ТВ-дисперсией). Сравнение выражений (24) и (17) с учетом условия $M_p = 0$ дает простой результат: $D_p = \Delta T_{eff}^2$. Соответственно, среднее квадратическое отклонение в теоретико-вероятностном смысле также имеет простую связь с показателями в нашем случае: $\sigma = \sqrt{D_p} = \Delta T_{eff}$. Стало быть, для аналитических исследований функций вида $p(t)$ можно применить всю мощь математического аппарата теории вероятностей. В частности, для наших целей продуктивным оказывается неравенство Чебышева [32]. Опуская промежуточные вкладки, сразу запишем следствие из данного неравенства в интегральном виде:

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} p(t) dt > 1 - \frac{D_p}{\varepsilon^2} = 1 - \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2}, \quad (25)$$

где ε – произвольное положительное число. Часто неравенство (25) рассматривается в частном случае «правила трех сигм» [31], когда полагают $\varepsilon = 3 \cdot \sigma$. Несколько обобщая это правило, рассмотрим неравенство (25) для правила «N сигм»:

$$\int_{-N\sigma}^{N\sigma} p(t) dt > 1 - \frac{\sigma^2}{N^2 \sigma^2} = \frac{N^2 - 1}{N^2}. \quad (26)$$

В наших терминах полученное неравенство означает, что в интервале $\pm N \cdot \Delta T_{eff}$ будет сосредоточено не менее $\frac{N^2 - 1}{N^2} \cdot 100\%$ энергии импульса любой формы. Слова «любой формы» здесь являются ключевыми.

Легко вычислить, что при $N = 3$ в интервале $\pm N \cdot \Delta T_{eff}$ будет сосредоточено не менее 89% энергии любого импульса, при $N = 5$ – не менее 96% энергии, в интервале $N = 7$ – не менее 98% энергии и т.д.

Пользуясь далее правилом «трех сигм» и считая, что примерно 90% энергии будет сосредоточено в полосе $\pm 3 \cdot \Delta T_{eff}$, введем определение *расчетной длительности импульса* (РДС): $\Delta T_p = 6 \cdot \Delta T_{eff}$. Аналогичным образом определяется *расчетная ширина спектра* (РШС) для шкалы угловых частот

$\Delta\Omega_p = 6 \cdot \Delta\Omega_{eff}$ и для шкалы циклических частот $\Delta F_p = 6 \cdot \Delta F_{eff} = \frac{3}{\pi} \Delta\Omega_{eff}$. Соответственно, вводятся определения *расчетной базы импульса* (РБИ) для шкалы угловых частот и для шкалы циклических частот:

$$a) \quad B_{p\Omega} = 36 \cdot \Delta T_{eff} \cdot \Delta\Omega_{eff} \quad b) \quad B_{pF} = \frac{18}{\pi} \cdot \Delta T_{eff} \cdot \Delta\Omega_{eff} \quad (27)$$

Относительные оценки эффективности импульсов на основе критериев (4–5) удобно получать при использовании квадратичных показателей (17-20), тогда как приблизительные значения длительности импульсов и занимаемых ими полос частот дают линейные показатели в виде приведенных выше расчетных характеристик. Лемма эквивалентности показывает, что решение задач оптимизации на основе показателей эффективной базы (20) дает тот же результат, что и на основе РБИ (27).

6. Оптимальные свойства гауссовых импульсов

Целью настоящего пункта является обоснование ряда оптимальных свойств гауссова импульса, который исторически назывался «колокольным» [23]. В общем виде такой импульс задается математической формой:

$$u(t, a, b) = a \cdot \exp(-bt^2), \quad \alpha, \beta > 0. \quad (28)$$

Значение функции (28) в прикладных и теоретических задачах трудно переоценить. Только перечисление таких задач заняло бы увесистый том. Достаточно вспомнить о роли нормального (гауссова) распределения в теории вероятностей и теории случайных процессов [31, 32]. По существу, замкнутые выражения для многомерных случайных величин получаются именно для нормального распределения.

Применимость данной функции обуславливается, видимо, набором ее свойств, которые в совокупности делают ее уникальной. В частности, для теоретических исследований удобно, что данная функция является непрерывной, непрерывно дифференцируемой до любого порядка. В то же время она является компактной в том смысле, что ее «хвосты» очень быстро убывают. Например, «правило трех сигм» для нормального распределения дает примерно 97% вероятности попадания в интервал $\pm 3\sigma$ [31]. Также удобным математическим свойством является устойчивость к интегральным преобразованиям. В частности, спектральная плотность данного импульса (табличный интеграл [33, с. 344])

$$g(\omega, \alpha, \beta) = a \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-bt^2 - j\omega t) dt = \frac{a\sqrt{\pi}}{\sqrt{b}} \exp\left(-\frac{\omega^2}{4b}\right) \quad (29)$$

также является гауссовой функцией с параметрами

$$\alpha = a\sqrt{\pi} / \sqrt{b}, \quad \beta = 1/(4b) \quad (30)$$

В силу симметрии операций прямого и обратного преобразования Фурье можно ожидать, что оптимальный по критерию минимума эффективной базы (20) импульс как раз и должен иметь одинаковую математическую форму как во временной, так и в частотной области.

Далее понадобится известное тождество [23, 30], устанавливающее связь между эффективной длительностью сигнала и его спектральной плотностью:

$$\Delta T_{eff}^2 = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} |g'(\omega)|^2 d\omega, \quad (31)$$

где g' в данном случае обозначает первую производную, а энергия сигнала выражается через его представление во временной области:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt = a^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2bt^2) dt = a^2 \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2b}} \quad (32)$$

и в спектральной области:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g^2(\omega) d\omega = \frac{\alpha^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\beta t^2) dt = \frac{\alpha^2}{2\sqrt{2\pi\beta}} \quad (33)$$

Нетрудно видеть, что с учетом параметрических зависимостей (30) определения (32) и (33) дают один и тот же численный результат.

Покажем, что в смысле ведущих критериев (4, 5) гауссов импульс является оптимальным. Отметим, что сравнительный анализ эффективной базы гауссова импульса с базой конкретных импульсов дается во многих работах, в частности, в [23]. Вместе с тем, завершено аналитического решения автору найти не удалось. Поэтому сформулируем задачу в общем виде.

Пусть дано множество сигналов с одинаковой энергией (без потери общности будем рассматривать сигналы с единичной энергией):

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g^2(\omega) d\omega = 1 \quad (34)$$

и одинаковой эффективной длительностью, которую выразим с использованием тождества (31):

$$\Delta T_{eff}^2 = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} |g'(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |g'(\omega)|^2 d\omega = T^2. \quad (35)$$

Очевидно, в этих условиях наименьшую базу будет иметь сигнал с минимальной шириной спектра, то есть сигнал, доставляющий минимум функционалу:

$$\frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 g^2(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 g^2(\omega) d\omega \rightarrow \min! \quad (36)$$

Таким образом, условия (34-36) соответствуют постановке *изопериметрической задачи* вариационного исчисления в классической постановке [34]. Поскольку эта задача хорошо изучена, дадим ход ее решения конспективно.

Решение данной задачи с учетом ограничений (34, 35) сводится к эквивалентной задаче оптимизации функционала:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega, g, g') d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} [\omega^2 g^2(\omega) + \lambda_1 g^2(\omega) + \lambda_2 |g'(\omega)|^2] d\omega \rightarrow \min!, \quad (37)$$

где λ_1 и λ_2 – свободные параметры, определяемые из условий (34, 35).

Оптимизация функционала (37) сводится к приравнению нулю его первой вариации, что эквивалентно решению дифференциального уравнения Эйлера, которое в данном случае записывается в общем виде:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial g} - \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial g'} \right) = 0, \quad (38)$$

которое после несложных преобразований приводится к виду:

$$\frac{\partial^2 g(\omega)}{\partial \omega^2} - \frac{(\omega^2 + \lambda_1)}{\lambda_2} g(\omega) = 0. \quad (39)$$

Интересно, что в классической монографии [23] сформулирована аналогичная вариационная задача и даже получено дифференциальное уравнение, аналогичное (39). Почему-то после этого А.А. Харкевич ограничился параметрическим решением и вывел нижнюю числовую грань значений эффективной базы сигнала, остановившись за пол шага до получения решения в замкнутом аналитическом виде. На самом деле общее решение уравнения (39) можно найти в справочной литературе. Мы для этих целей воспользуемся современными технологиями: многофункциональным онлайн калькулятором [35]. Общее решение получается в форме:

$$g(\omega) = C_1 D_{\frac{1}{2}(-a\sqrt{b}-1)} \left(\omega \sqrt{2\sqrt[4]{b}} \right) + C_2 D_{\frac{1}{2}(a\sqrt{b}-1)} \left(j\omega \sqrt{2\sqrt[4]{b}} \right), \quad (40)$$

где $a = \lambda_1$, $b = 1/\lambda_2$, D – функции параболического цилиндра (например, [36, с. 1078]). Функции параболического цилиндра не выражаются в элементарных функциях, и анализ полученного решения оказывается довольно сложным. Может, это и остановило окончательное решение задачи в [23], поскольку функцию (40) легче запомнить, чем понять. К тому же создание реального генератора функций параболического цилиндра представляется задачей увлекательной, но едва ли разрешимой.

Чтобы радикально упростить ситуацию, будем искать не общее, а *частное* решение уравнения (40). Это решение будем искать как раз в виде функции (29). Прямая подстановка данной функции в уравнение (40) дает обыкновенное алгебраическое уравнение:

$$\left(4\alpha\beta^2 - \frac{1}{\lambda_2} \right) \omega^2 \exp(-\beta\omega^2) - \left(2\alpha\beta + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \exp(-\beta\omega^2) = 0, \quad (41)$$

которое при любом значении частоты ω удовлетворяется, если выполнена система условий:

$$\begin{cases} 4\alpha\beta^2 - \frac{1}{\lambda_2} = 0 \\ 2\alpha\beta + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 0 \end{cases}. \quad (42)$$

Система уравнений (42) имеет единственное решение:

$$\alpha = \lambda_1^2 / \lambda_2, \quad \beta = -1 / \lambda_1 \quad (43)$$

или, что тождественно, решение относительно свободных коэффициентов функционала (37):

$$\lambda_1 = -1 / \beta, \quad \lambda_2 = 1 / (\alpha\beta^2). \quad (44)$$

Таким образом показано, что сигнал с гауссовой спектральной плотностью является оптимальным по критерию минимальной эффективной базы по крайней мере на множестве функций, которые не имеют существенных особенностей первой производной спектральной плотности. С учетом сохранения гауссовой формы в прямом и обратном преобразовании Фурье тем самым показано, что гауссов импульс обладает наименьшей эффективной базой. Заметим, что здесь мы не утверждаем, что гауссов сигнал является в этом смысле единственным. В силу Леммы эквивалентности тем самым получено решение задачи оптимизации и по линейному критерию (4).

Покажем, что и при выполнении ряда не стеснительных предположений гауссов импульс является также оптимальным с точки зрения критерия приведенной базы (5), учитывающего возможную деформацию сигнала на стороне приема.

Для этого уточним выражение (31) применительно к дисперсионной модели (14), из которой непосредственно следует, что на стороне приема (на расстоянии z от точки ввода сигнала в ОБ) спектральная плотность определяется выражением:

$$g(\Omega, z) = G(\Omega) \exp\left(-jz \sum_{m=2}^M \frac{1}{m!} k_{\omega 0}^{[m]} \Omega^m\right) = G(\Omega) \exp[-jz \varphi(\Omega)], \quad (45)$$

где $G(\Omega)$ – спектральная плотность в момент ввода сигнала в ОБ.

Покажем, что спектральная плотность является устойчивой по отношению к материальной дисперсии характеристикой сигнала. В самом деле, из выражения (45) непосредственно следует, что

$$g^2(\Omega, z) = G(\Omega) \exp[-jz \varphi(\Omega)] \cdot G(\Omega) \exp[jz \varphi(\Omega)] = G^2(\Omega). \quad (46)$$

Следствие из тождества (46):

$$\Omega^2 g^2(\Omega, z) = \Omega^2 G^2(\Omega), \quad (47)$$

откуда, в свою очередь, следует:

$$\frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 g^2(\Omega, z) d\Omega = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G^2(\Omega) d\Omega, \quad (48)$$

то есть, материальная дисперсия не изменяет эффективную ширину спектра.

Из выражения (45) получим выражение для производной функции g :

$$g'(\Omega, z) = G'(\Omega) \exp[-jz \varphi(\Omega)] - jz \varphi'(\Omega) G(\Omega) \exp[-jz \varphi(\Omega)], \quad (49)$$

откуда

$$[g'(\Omega, z)]^2 = [G'(\Omega)]^2 + z^2 [\varphi'(\Omega)]^2 G^2(\Omega), \quad \varphi'(\Omega) = \sum_{m=2}^M \frac{1}{(m-1)!} k_{\omega 0}^{[m]} \Omega^{m-1}. \quad (50)$$

Ограничимся случаем узкополосного сигнала, когда $M = 2$ (т.е. случаем «дисперсии групповых скоростей»). Обозначим $k_{\omega 0}^{[2]} = K$. Тогда в выражение для производной фазы (50) запишется в виде:

$$[g'(\Omega, z)]^2 = [G'(\Omega)]^2 + z^2 K^2 \Omega^2 G^2(\Omega). \quad (51)$$

Сформулируем вариационную задачу для этого случая. В отличие от задачи (34-36) с учетом тождеств (46-48) в качестве устойчивых характеристик примем ограничения энергии и эффективной ширины спектра в момент ввода в ОБ:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G^2(\Omega) d\Omega = 1, \quad \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G^2(\Omega) d\Omega = F^2, \quad (52)$$

а минимизировать будем эффективную длительность импульса на стороне приема:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [g'(\Omega, z)]^2 d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{ [G'(\Omega)]^2 + z^2 K^2 \Omega^2 G^2(\Omega) \} d\Omega \rightarrow \min! \quad (53)$$

Тем самым, условия (52) и критерий (53) снова сводят решаемую задачу к изопериметрической задаче вариационного исчисления. Соответственно, сводим ее к приравнению нулю первой вариации функционала:

$$\int_{-\infty}^{\infty} [(G')^2 + z^2 K^2 \Omega^2 G^2 + \gamma \Omega^2 G^2 + \mu G^2] d\Omega, \quad (54)$$

где γ и μ – свободные параметры, определяемые из условий (52). Дифференциальное уравнение Эйлера (38) в данном случае приводится к виду:

$$\frac{\partial^2 G(\Omega)}{\partial \Omega^2} - (\gamma + z^2 K^2) \Omega^2 G(\Omega) - \mu G(\Omega) = 0. \quad (55)$$

Полагая в уравнении (55)

$$(\gamma + z^2 K^2) = \frac{1}{\lambda_1}, \quad \mu = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

видим, что оно по форме свелось к уравнению (39) и, следовательно, имеет с точностью до параметров те же функциональные решения, что и уравнение (39).

Таким образом, показано, что гауссов импульс обладает свойством минимума эффективной базы на стороне приема в условиях дисперсии групповых скоростей. Отсюда следует, что в данных условиях он удовлетворяет критерию минимума приведенной базы (5). Также очевидным следствием является его минимальное расширение вследствие эффекта материальной дисперсии в узкополосном канале передачи.

7. Сравнение дисперсионных эволюций гауссова импульса и импульса Найквиста

Анализ оптимальных свойств Гауссова импульса оказался бы неполным без сравнения с импульсами другой формы. Идти по стандартному пути сравнения с другими типичными теоретическими сигналами (прямоугольным, треугольным и т.п.) представляется напрасной тратой времени. В качестве импульса для сравнения лучше взять такую функцию, которая заведомо обладает другими оптимальными свойствами.

В качестве такой функции мы выберем импульс Найквиста, поскольку глубоко разработана теория собственно для данного импульса [28]. Кроме того, разработан метод [17] воспроизведения с определенной точностью частного вида такого сигнала с НЧС в виде импульса Найквиста-Котельникова:

$$U_N(t) = A \cdot \text{sinc}(\pi t / T) = A \frac{\sin(\pi t / T)}{\pi t / T}. \quad (56)$$

спектральная плотность которого [23]:

$$G_N(\Omega) = B \cdot \text{rect}[-\pi / T, +\pi / T], \quad B = A \cdot T, \quad (57)$$

где

$$\text{rect}[a, b] = \begin{cases} 0, & \Omega < a \\ 1, & a \leq \Omega \leq b \\ 0, & \Omega > b \end{cases}. \quad (58)$$

Заметим, что замена знаков строгого неравенства в определении (58) на знаки нестрогого неравенства с точки зрения последующего интегрирования принципиально ничего не меняет. Иногда в этом определении функция дополняется промежуточными значениями 1/2 в точках разрыва a и b , но это тоже от лукавого: разрыв все равно оказывается неустранимым.

Импульс Найквиста обладает оптимальными свойствами селективности по различным критериям. Не все из этих критериев представляют одинаковый интерес в задачах оптимизации ВОСП. В частности, удовлетворение первому критерию Найквиста [28] требует почти идеальной синхронизации. Сомнения в возможности таковой применительно к ВОСП мы сформулировали в п. 4 настоящей работы. С другой стороны, тождество (13) позволяет говорить об устойчивости энергетического спектра сигналов в ВОСП. В этом смысле сигнал (56) обладает *идеальной* селективностью в частотной области, чем и интересен для сравнительного анализа. К сожалению, в цитированной выше работе [17] аспект влияния дисперсии на эволюцию формы импульса Найквиста-Котельникова не рассмотрен. Частично ликвидируем этот пробел.

Ограничимся здесь рассмотрением случая дисперсии групповых скоростей. Тогда выражение для эффективной длительности НЧС импульса (37) с учетом формулы для производной фазы (51) можно представить в виде суммы двух интегралов:

$$\Delta T_{eff}^2(z) = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} [g'(\Omega, z)]^2 d\Omega = I_1 + I_2, \quad (59)$$

где

$$I_1 = \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} [G'(\Omega)]^2 d\Omega, \quad I_2 = \frac{z^2 K^2}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G^2(\Omega) d\Omega. \quad (60)$$

Анализ выражений (60) показывает, что интеграл I_1 – эффективная длительность сигнала в момент его ввода в ОВ (при $z = 0$), а интеграл I_2 – приращение его эффективной длительности на расстоянии z от точки ввода.

Сделаем удобное с математической точки зрения и логичное с практической точки зрения предположение, что $I_2 \gg I_1$. Это означает, что начальная длительность сигнала пренебрежимо мала по сравнению с его расширением вследствие дисперсионных искажений. Такое предположение вполне согласуется с выбранным порядком длин РУ (100-300 км). Тогда будем считать, что $\Delta T_{eff}^2(z) \approx I_2$. С математической точки зрения разделение на два интеграла (60) позволяет включить в рассмотрение группу сигналов с вырожденной производной $G'(\Omega)$ спектральной плотности. Именно, такой случай характерен для импульса Найквиста-Котельникова (56), у которого производная спектральной плотности (57) вырождается в пару δ -функций Дирака в точках $\pm \pi / T$. Не забудем, что эти функции Дирака в

соответствие с выражением (60) надо будет суметь возвести в квадрат, что породит математического монстра, с которым не ясно, что делать.

Представление (60) дает возможность сравнения дисперсионного удлинения различных импульсов в следующей постановке задачи. Полагаем, что импульсы $U_N(t)$ и $U_G(t)$ со спектральными плотностями соответственно $G_N(\Omega)$ и $G_G(\Omega)$ имеют одинаковую энергию E (без нарушения общности полагаем $E = 1$) и одинаковую начальную длительность (одинаковое значение интеграла I_1 или иной способ вычисления начальной длительности). В этих условиях определяем отношение функционалов

$$I_2(G_N)/I_2(G_G), \tag{61}$$

которое в [29] названо «квадратичным показателем относительной дисперсии» (КПОД). Данный показатель удобен тем, что позволяет приблизительно оценить, во сколько раз эффективная длительность импульса $U_N(t)$ окажется больше (или меньше), чем эффективная длительность импульса $U_G(t)$ вследствие дисперсионного искажения.

Функционал I_2 удобен тем, что в нем явным образом разделены свойства среды и свойства импульса. При этом дисперсионный коэффициент, выраженный через производные коэффициента преломления $n(\omega)$, скорость света в вакууме c и расстояние z , пройденное импульсом вдоль ОВ

$$z^2 K^2 = z^2 (k_{\omega 0}^{[2]})^2 = z^2 \frac{1}{c^2} \left(2 \frac{\partial n(\omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} + \frac{\omega_0^2 \partial^2 n(\omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega_0} \right)$$

не зависит от спектральной плотности импульса $G(\Omega)$. В свою очередь, интеграл $\frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G^2(\Omega) d\Omega$ – эффективная ширина спектра импульса в момент ввода в ОВ не зависит от расстояния z и от свойств среды распространения. Тем самым КПОД – отношение эффективной ширины спектра двух разных сигналов в момент ввода в ОВ.

Поскольку в относительных величинах (61) абсолютные масштабы не играют роли, положим в определении (56) параметр $T = \pi$, тогда из выражения для спектральной плотности следует, что:

$$G_N = B \text{rect}[-1,1], \quad E = \frac{1}{\pi} B^2 = 1 \Rightarrow B = \sqrt{\pi}, \quad AT = B \Rightarrow A = \frac{1}{\sqrt{\pi}}. \tag{62}$$

Для того чтобы «сравнивать сравнимое» с учетом трагической неопределенности интеграла I_1 для спектральной плотности вида [57], определим начальную длительность импульса Найквиста-Котельникова по правилу «трех сигм». Для этого найдем эффективную длительность путем взятия интеграла

$$\Delta T_N^2 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 U_N^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 \frac{\sin^2(t)}{t^2} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \sin^2(t) dt, \tag{63}$$

который расходится и, следовательно, не берется. Выйдем из очевидного тупика опять-таки с помощью правила «трех сигм». В качестве начальной длительности определим такой интервал времени, в котором для импульса Найквиста-Котельникова и для гауссова импульса сосредоточено примерно 97% энергии. Для гауссова импульса это как раз соответствует правилу «трех сигм», а для импульса Найквиста-Котельникова аналогичное условие можно вывести из энергетической функции вида $\sin^2(t)/t^2$. С учетом четности данной функции рассмотрим положительную полуось аргумента. За 100 % «энергии» примем значение табличного интеграла [33]:

$$\int_0^{\infty} \frac{\sin^2(t)}{t^2} dt = \frac{\pi}{2}. \tag{64}$$

Ограничимся исследованием интервалов времени, соответствующим нулям функции $\sin^2(t)/t^2$. Задача, таким образом, сводится к приближенному решению уравнения:

$$I(m) = \int_0^{m \cdot \pi} \frac{\sin^2(t)}{t^2} dt \approx 0,97 \frac{\pi}{2}, \quad m = 1, 2, \dots \tag{65}$$

Интеграл в уравнении (65) не выражается в элементарных функциях. Поэтому приведем ряд значений этого интеграла, определенных численными методами (таблица 1).

Анализ таблицы 1 показывает, что оптимальным в смысле решения уравнения (65) является значение $m = 3$. Соответственно, начальную длительность сигнала (56) с учетом масштабирования (62) положим приблизительно равной 6π (считаем, что основная часть энергии сигнала заключена в интервале $\pm 3\pi$).

Значения интеграла в формуле (65)

m	∞	1	2	3	4	5
$I(m)$	1,57079	1,41815	1,49216	1,51803	1,53113	1,53903
$100 \cdot I(m) / I(\infty)$	100	90,28	94,99	96,64	97,47	97,98

В сопоставимых единицах начальную длительность гауссова импульса (28) получим в виде правила «трех сигм», где параметр «сигма» должен быть в этом случае равен π . С учетом требования равенства энергий $E = 1$ и с использованием табличных интегралов [33] получим систему уравнений для гауссова импульса:

$$\begin{cases} E = \int_{-\infty}^{\infty} U_G^2(t) dt = a^2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-bt^2) dt = a^2 \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2b}} = 1 \\ \Delta T_G^2 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 U_G^2(t) dt = a^2 \frac{\sqrt{\pi}}{4b\sqrt{2b}} = \pi^2 \end{cases}, \quad (66)$$

решение которой запишем в виде:

$$a^2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{2\pi}}, \quad b = \frac{1}{4\pi^2}.$$

Из выражений для спектральной плотности гауссова импульса после некоторых преобразований получим эффективную ширину спектра в данном случае:

$$\Delta\Omega_G^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_G^2(\Omega) d\Omega = \frac{a^2 \pi}{\sqrt{b}\sqrt{2\pi}} = 1. \quad (67)$$

Аналогично, для эффективной ширины спектра импульса Найквиста-Котельникова с учетом значений параметров (62) получим:

$$\Delta\Omega_N^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_N^2(\Omega) d\Omega = \frac{B^2}{2\pi} \int_{-1}^1 \Omega^2 d\Omega = \frac{2}{3} \pi. \quad (68)$$

Вычисление КПОД (61) в данном случае дает:

$$I_2(G_N) / I_2(G_G) = \Delta\Omega_N^2 / \Delta\Omega_G^2 = \frac{2}{3} \pi \approx 2. \quad (69)$$

Итак, в соответствии с КПОД импульс Найквиста-Котельникова примерно вдвое «хуже» гауссова импульса. В единицах линейного масштаба это означает, что увеличение длительности первого из них примерно в 1,5 раза больше, чем второго. Соответственно, и скорость передачи данных гауссовыми импульсами в соответствии с этими оценками может быть в 1,5 выше, чем скорость передачи импульсами Найквиста-Котельникова в ВОСП.

Являются ли полученные результаты (67-69) «приговором» импульсу Найквиста и однозначным аргументом в пользу выбора гауссова импульса? Конечно, нет. Здесь мы рассмотрели сравнительные характеристики только в смысле одного из показателей. Практически более значимыми могут оказаться совершенно иные соображения. Кроме того, из различных видов импульсов, удовлетворяющих критериям Найквиста, мы рассмотрели простейший случай. Сигнал вида (56) с точки зрения устойчивости по отношению к дисперсии представляет некоторый «нейтральный случай» (в [29] он назван сигналом с нейтральным спектром, NS-сигналом). Качественно можно говорить, что сигналы с унимодальным спектром менее подвержены удлинению за счет воздействия дисперсии, чем NS-сигналы. Худший случай – сигналы с бимодальным спектром (рис. 5). Поэтому можно ожидать, что импульс Найквиста, например, со спектральной плотностью в виде «приподнятого косинуса» [28] при больших значениях коэффициента сглаживания даст лучшие значения КПОД. Но этот вопрос выходит за рамки данной работы.

8. Сигнальные системы импульсов равного дисперсионного удлинения

Общий смысл методов сигнального уплотнения заключается в использовании алфавита сигналов с разными НЧС:

$$U_1(t), U_2(t), \dots, U_M(t). \quad (70)$$

Возможность передачи одного из возможных сигналов алфавита (70) в одном межимпульсном интервале (далее – такт) дает возможность увеличить скорость передачи в $\log_2(M)$ раз по сравнению с бинарным кодированием типа «нет импульса в такте – ноль», «есть импульс в такте – единица».

Для любой системы передачи сигналы алфавита (70) должны подчиняться очевидным требованиям:

а) должна быть возможность их физического воспроизведения (реализации) хотя бы с какой-то точностью, достаточной в рамках решаемой практической задачи;

б) сигналы алфавита должны быть различимы на стороне приема хотя бы с некоторой достаточной в конкретном случае вероятностью;

в) сигналы алфавита должны не катастрофически влиять на сигнальные потоки в других каналах или системах передачи;

г) сигналы алфавита должны не очень-то сильно влиять друг на друга, иначе говоря, межимпульсная интерференция должна быть достаточно малой.

Требования экономической или энергетической эффективности также являются важными, но их выполнение связано с рассмотрением конкретных практических задач. Применительно к рассматриваемым типам ВОСП, сочетающих реализацию методов TDM, FDM и WDM, требование в) сводится к тому, чтобы сигналы алфавита (70) были достаточно компактны в спектральной области, иначе говоря, чтобы расчетная ширина их спектра была не намного больше выделенной частотной полосы канала передачи. Выполнение требования г) для ВОСП имеет специфику, обусловленную дисперсионными эффектами в ОБ.

В самом деле, скорость передачи данных будет обратно пропорциональна длительности такта, который, в свою очередь, будет зависеть от максимальной длительности сигналов алфавита (70) на стороне приема. Таким образом, скорость передачи будет ограничиваться именно тем сигналом, который имеет максимальное увеличение длительности под влиянием дисперсии в ОБ. Следовательно, «хорошим» алфавитом сигналов можно считать такой, для которого в условиях дисперсии групповых скоростей функционал I_2 (60) будет иметь приблизительно одинаковое значение для всех сигналов.

Теоретически множество таких алфавитов сигналов является бесконечным. Мы будем руководствоваться интуитивным правилом: сигналы алфавита должны иметь приблизительно одинаковую математическую форму. Это правило косвенно следует из требования а): если сигнал некоторой формы можно воспроизвести с достаточной точностью, то, скорее всего, и близкие по форме сигналы также можно воспроизвести.

В общем виде алфавит (70) будем рассматривать в виде параметрического семейства:

$$u_m(t) = U_m(t) \exp(j\omega_0 t), \quad U_m(t) = A_m(t, \bar{A}_{m,L}) \cos(\Omega_{d,m}),$$

$$\bar{A}_{m,L} = \langle \alpha_{m,1}, \alpha_{m,2}, \dots, \alpha_{m,L} \rangle, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (71)$$

где $U_m(t)$ – НЧС сигнала; ω_0 – центральная частота спектра излучения лазера (несущая); A_m – огибающая НЧС сигнала; $\bar{A}_{m,L}$ – вектор параметров; $\Omega_{d,m}$ – параметр отстройки от несущей (поднесущая); M – общее количество различных сигналов алфавита.

В модели дисперсии групповых скоростей задача синтеза сигналов семейства (71) сводится к поиску набора функций, удовлетворяющих следующим условиям:

1. Условие существования прямого и обратного преобразования Фурье

$$G_m(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_m(t) \exp(-j\Omega t) dt, \quad U_m(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_m(\Omega) \exp(j\Omega t) d\Omega, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (72)$$

2. Условие равенства и ограниченности энергий

$$E_m = \int_{-\infty}^{\infty} U_m^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_m^2(\Omega) d\Omega = E, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (73)$$

Выполнение этого условия соответствует, в том числе, требованию относительной малости мощности импульса, что предотвращает нелинейные эффекты.

3. Условие равенства дисперсионного удлинения сигналов, следующее из выражений (60, 61)

$$D_m = \frac{1}{2\pi E_m} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_m^2(\Omega) d\Omega = D, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (74)$$

4. Условие различимости в спектральной области: существует некоторая метрика R в пространстве функций $G(\Omega)$, что для любой пары сигналов семейства (71) выполняется условие:

$$R[G_l(\Omega), G_k(\Omega)] > 0, \quad l, k = 1, 2, \dots, M. \quad (75)$$

Условиям (72-75) удовлетворяет бесконечное множество алфавитов сигналов. Аналитические выражения для НЧС в форме импульсов Найквиста-Котельникова и для НЧС в форме гауссова импульса получены в работе [19]. Там же доказано следующее предложение, позволяющее существенно расширить алфавит сигналов, если найдена некоторая система функций, удовлетворяющая условиям (72-75).

Теорема 1. Пусть дана система сигналов $\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ с ортогональными спектральными плотностями $\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$, все сигналы которой удовлетворяют условиям равной энергии $E_m = E$ (73), и для всех сигналов выполнено условие равенства дисперсионного удлинения $D_m = D$ (74). Тогда любая функция из линейного многообразия, натянутого на эти функции:

$$W = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \dots + \alpha_M U_M \quad (76)$$

будет иметь то же значение дисперсионного функционала D , что и каждая из этих НЧС.

Эта Теорема позволяет существенно расширить алфавит сигналов, если найдена базовая система функций (71). Условия Теоремы 1 сводят ее применимость к случаю, когда НЧС сигналов выбирается на множестве импульсов Найквиста. Докажем аналогичное предложение в более конструктивной форме.

Теорема 2. Пусть дана система сигналов $\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ с ортогональными спектральными плотностями $\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$, все сигналы которой удовлетворяют условиям равной энергии $E_m = E$ (73), и для всех сигналов выполнено условие равенства дисперсионного удлинения $D_m = D$ (74). Тогда любая функция из линейного многообразия, натянутого на эти функции:

$$W = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \dots + \alpha_M U_M \quad (77)$$

при условии, что сумма квадратов коэффициентов

$$A = \sum_{m=1}^M \alpha_m^2 = 1 \quad (78)$$

обладает следующими свойствами:

а) она имеет то же значение энергии, что и каждая из функций системы $\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$;

б) она имеет то же значение дисперсионного удлинения, что и каждая из функций системы $\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$.

Для доказательства следствия а) используем свойство линейности преобразования Фурье. Спектральная плотность G_W функции W будет:

$$G_W = \alpha_1 G_1 + \alpha_2 G_2 + \dots + \alpha_M G_M,$$

откуда энергия суммарного сигнала W :

$$E_W = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_W^2 d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^M (\alpha_m G_m)^2 d\Omega = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M \alpha_m^2 \int_{-\infty}^{\infty} G_m^2 d\Omega + \frac{1}{\pi} \sum_{k \neq l} \alpha_k \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} G_k G_l d\Omega. \quad (79)$$

Второе слагаемое в конечном выражении формулы (79) тождественно равно нулю вследствие ортогональности функций $\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$. Тогда

$$E_W = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M \alpha_m^2 \int_{-\infty}^{\infty} G_m^2 d\Omega = \sum_{m=1}^M \alpha_m^2 \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_m^2 d\Omega = E \sum_{m=1}^M \alpha_m^2 = E,$$

что и требовалось доказать.

Доказательство следствия б) аналогично.

Теоремы 1 и 2 могут применяться для сигнального уплотнения ВОСП также и в случаях, когда условие ортогональности нарушается незначительно. Так, для неотрицательных вещественных функций $\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$ условия приближительной ортогональности применительно к решаемой задаче можно сформулировать в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} \max(k, l) \frac{1}{2\pi E} \int_{-\infty}^{\infty} G_k G_l d\Omega \ll 1 \\ \max(k, l) \frac{1}{2\pi D} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_k G_l d\Omega \ll 1 \end{cases} \quad (80)$$

При значительных перекрытиях носителей спектральных плотностей условия (80) не выполняются. Такой случай может быть характерен для гауссовых импульсов с близкими поднесущими Ω_d по определениям (71). В данной ситуации задача получения вторичного алфавита вида (77) из первичного алфавита сигналов, определяемого условиями (72-75) решается, вообще говоря, численными методами. Полезной при этом может оказаться следующая теорема существования решений.

Теорема 3. Пусть дана система сигналов $\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ с неотрицательными вещественными спектральными плотностями $\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$, все сигналы которой удовлетворяют условиям равной энергии $E_m = E$ (73), и для всех сигналов выполнено условие равенства дисперсионного удлинения $D_m = D$ (74). Тогда для существования такого набора значений коэффициентов $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\}$ линейного многообразия (77), удовлетворяющего условиям баланса энергии $E_W = E$ и баланса функционала дисперсионного удлинения $D_W = D$ достаточно выполнения условия баланса параметра

неортогональности:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_k G_l d\Omega = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_k G_l d\Omega, \quad \forall k, l. \quad (81)$$

Для доказательства воспользуемся выражением (79), освобождаясь от множителя $1/2\pi$. После тождественных преобразований в условиях Теоремы запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} E \sum_{m=1}^M \alpha_m^2 + 2 \sum_{k \neq l} \alpha_k \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} G_k G_l d\Omega = E \\ D \sum_{m=1}^M \alpha_m^2 + 2 \sum_{k \neq l} \alpha_k \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_k G_l d\Omega = D \end{cases} \quad (82)$$

Во втором уравнении системы (82) интеграл по теореме о среднем можно представить в виде:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 G_k G_l d\Omega = \gamma_{k,l} \int_{-\infty}^{\infty} G_k G_l d\Omega,$$

где $\gamma_{k,l}$ – некоторое число. Но по условию баланса параметра неортогональности (81) $\gamma_{k,l} = \mu, \quad \forall k, l$.

Тогда из системы уравнений (82) после несложных преобразований получим одно уравнение:

$$\frac{2}{E} \sum_{k \neq l} \alpha_k \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} G_k G_l d\Omega = \frac{2\mu}{D} \sum_{k \neq l} \alpha_k \alpha_l \int_{-\infty}^{\infty} G_k G_l d\Omega \Rightarrow D = \mu E, \quad (83)$$

но из условия (81) следует, что при совпадении $k = l$ для любого сигнала из множества $\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ с одинаковой энергией уравнение (83) обращается в тождество. Теорема доказана.

Приведем конкретное параметрическое решение задачи синтеза алфавита (71) применительно к семейству гауссовых сигналов. Низкочастотные составляющие сигнала с гауссовыми огибающими (28) представим в такой форме:

$$U_m(t, z = 0) = \frac{1}{\sigma_m \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma_m^2}\right) \cos(\Omega_{d,m} t). \quad (84)$$

В терминах теории вероятностей [31] параметр σ_m – средне квадратическое отклонение (СКО) огибающей НЧС. Примеры функций (84) и фрагментов их дисперсионных эволюций даны на рис. 7. Из этого рисунка, а также из выражений для дисперсионных функционалов (60) следует неформальное правило уравнивания дисперсионного удлинения импульсов: чем выше частота подмодуляции $\Omega_{d,m}$, тем уже должны быть составляющие спектра в окрестностях частот $\omega_0 \pm \Omega_{d,m}$. Соответственно, тем больше должна быть начальная длительность импульса. Пользуясь этим правилом, выполним промежуточные преобразования.

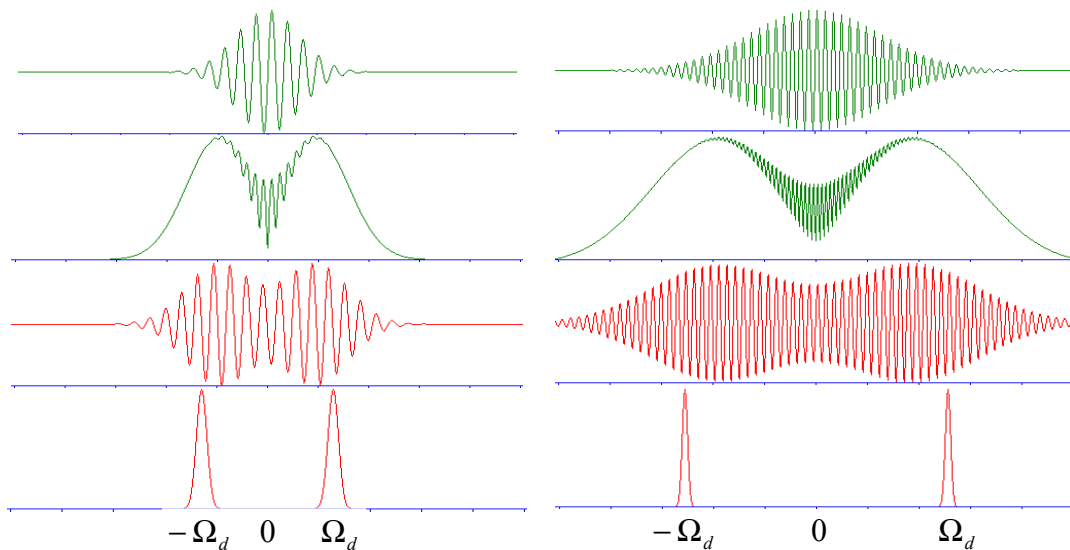


Рис. 7. Дисперсионная эволюция гауссовых импульсов с частотной модуляцией
Сверху вниз: начальная форма НЧС сигнала; модуль сигнала на расстоянии 25 км от точки ввода в ОВ;
вещественная часть сигнала на расстоянии 25 км от точки ввода в ОВ; модуль спектральной плотности
сигнала на расстоянии 50 км

Используя табличные интегралы [33] и применяя теорему модуляции, получим выражение для спектральной плотности и энергетического спектра:

$$G_m(\Omega) = \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{\sigma_m^2(\Omega \pm \Omega_{d,m})^2}{2}\right], \quad G_m^2(\Omega) = \frac{1}{4} \exp\left[-\sigma_m^2(\Omega \pm \Omega_{d,m})^2\right]. \quad (85)$$

Далее ограничимся рассмотрением только положительной части спектров на частоте $\omega_0 + \Omega_{d,m}$ в силу симметрии получаемых решений. Равное дисперсионное удлинение импульсов с НЧС (84) будет определяться системой уравнений:

$$D_m = \frac{\exp(\Omega_{d,m}^2 \sigma_m^2) \int_{-\infty}^{\infty} \Omega^2 \exp(-\sigma_m^2 \Omega^2 + 2\sigma_m^2 \Omega \Omega_{d,m}) d\Omega}{\exp(\Omega_{d,m}^2 \sigma_m^2) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\sigma_m^2 \Omega^2 + 2\sigma_m^2 \Omega \Omega_{d,m}) d\Omega} = D, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (86)$$

Используя табличные интегралы для уравнений (86), после тождественных преобразований приведем их к виду:

$$D_m = \frac{4\sigma_m^4 \Omega_{d,m}^2 + 2\sigma_m^2}{4\sigma_m^4} = \Omega_{d,m}^2 + \frac{1}{2\sigma_m^2} = D. \quad (87)$$

Как видим, полученная система уравнений (87) хорошо согласуется с ранее сделанными предположениями. В самом деле, чем больше значение параметра $\Omega_{d,m}^2$, тем больше должно быть значение параметра σ_m^2 , что означает: в частотной области «боковушки» спектра должны быть более узкими, а во временной области импульс должен быть более протяженным. Также эти уравнения хорошо согласуются с условием (81) баланса параметра неортогональности.

Можно рассматривать различные системы функций, удовлетворяющих условиям (87). Остановимся на достаточно общем случае, когда шкала поднесущих частот строится по правилу $\Omega_{d,m} = \Omega_{d,1} \sqrt{f(m)}$, где $f(m)$ – монотонно возрастающая функция, причем $f(1) = 1$. Также положим, что СКО огибающей НЧС во временной области для импульса порядка 1 определяется зависимостью: $\sigma_1^2 = 1/(2\alpha \Omega_{d,1}^2)$. Тогда из уравнений (87) следует, что СКО огибающей импульса порядка m во временной области должно удовлетворять условию:

$$f(m)\Omega_{d,1}^2 \sigma_m^2 + \frac{1}{2\sigma_m^2} = \Omega_{d,1}^2 + \alpha \Omega_{d,1}^2 \Rightarrow \sigma_m^2 = \frac{1}{2\Omega_{d,1}^2 [1 + \alpha - f(m)]}. \quad (88)$$

Решение уравнений вида (88) имеет смысл, если $1 + \alpha - f(m) > 0$. С учетом ранее сделанных предположений это условие выполняется, если для наибольшего порядка импульса выполнено $\alpha = f(M)$. Подбор параметра α и системы функций $f(m)$ требует, вообще говоря, решения непростой вариационной задачи оптимизации. Ограничимся частным случаем, пользуясь известным соотношением для СКО гауссова импульса (84) во временной области σ и в частотной области $\zeta = 1/\sigma$. Из уравнений (28) следует, что СКО модулей спектральной плотности должны удовлетворять уравнениям:

$$\zeta_m = \Omega_{d,1} \sqrt{2[1 + f(M) - f(m)]}. \quad (89)$$

При этом надо соблюсти некоторый баланс между распределением поднесущих в частотной области (они не должны располагаться слишком плотно), начальной длительностью импульсов и шириной спектра. Не идеальным, но компромиссным представляется вариант, когда $f(m) = m$. Расчеты параметров сигналов для этого случая и для циклической частоты $F_1 = \Omega_{d,1} / 2\pi = 20 \text{ ГГц}$ при $M = 8$ даны в таблице 2.

Таблица 2

Параметры системы гауссовых импульсов равного дисперсионного удлинения

m	$F_m, \text{ ГГц}$	$\Omega_m, 2\pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$	$\sqrt{2[1 + f(M) - f(m)]}$	$\zeta_m / 2\pi, \text{ ГГц}$	$\sigma_m, \text{ нс}$
1	2,0000E+01	1,2566E+02	4,0000E+00	8,0000E+01	1,2500E+01
2	2,8284E+01	1,7771E+02	3,7417E+00	7,4833E+01	1,3363E+01
3	3,4641E+01	2,1765E+02	3,4641E+00	6,9282E+01	1,4434E+01
4	4,0000E+01	2,5132E+02	3,1623E+00	6,3246E+01	1,5811E+01
5	4,4721E+01	2,8098E+02	2,8284E+00	5,6569E+01	1,7678E+01
6	4,8990E+01	3,0780E+02	2,4495E+00	4,8990E+01	2,0412E+01
7	5,2915E+01	3,3247E+02	2,0000E+00	4,0000E+01	2,5000E+01
8	5,6569E+01	3,5542E+02	1,4142E+00	2,8284E+01	3,5355E+01

Анализ табл. 2 показывает, что центральные частоты НЧС импульсов разнесены с достаточно большим для частотной фильтрации шагом. Во временной области ширина начальных импульсов также является сбалансированной: по уровню 0,5 от амплитуды этот параметр изменится менее чем на порядок. Также заметим, что система параметров по таблице 2 для случая дисперсии групповых скоростей не зависит от материала ОВ и от несущей ω_0 .

9. Методы воспроизведения гауссовых импульсов в оптическом диапазоне

Методика формирования оптических сигналов с НЧС заданной формы дана в работах [37-39]. Здесь приведем коротко основные положения. Проблема управления формой сигнала применительно к ВОСП имеет главный аспект: быстродействие. Считается [16], что STM-256 – предельный уровень STM, который еще допускает управление формой сигналов с помощью электронных устройств. Полупроводниковые элементы оказываются неэффективными из-за недопустимо большой длительности переходных процессов. Поэтому для формирования НЧС сигналов малой длительности принципиально использование в основном оптических компонентов [22]. Поскольку управление такими оптическими компонентами, как оптические усилители все равно осуществляется электронными устройствами, желательно параметры таких устройств перестраивать не чаще, чем один раз в течение такта. Примерно такой подход к формированию импульсов Найквиста рассмотрен в работе [17]. При этом авторы работы предлагают управлять начальной формой сигнала за счет формирования его спектральных характеристик, а распознавание сигналов на стороне приема осуществлять во временной области. Мы пойдем инверсным путем: формирование НЧС сигнала будем осуществлять во временной области, а его распознавание на стороне приема – в частотной области. Аргументом в пользу такого подхода является устойчивость энергетического спектра оптических сигналов.

Реализация алфавита сигналов (84) требует управления параметрами амплитуды для обеспечения условия равенства энергий, частотой поднесущей $\Omega_{d,m}$ и параметром начальной длительности импульса σ_m . Наиболее проблематичным здесь представляется именно управление длительностью импульса. Источник излучения (лазер) дает на выходе импульс определенной формы, который легко усилить или ослабить с помощью, например, аттенуаторов или усилителей Фарби-Пьеро [12], но уж никак не растянуть или сжать по длительности. Общая схема устройства, реализующего принцип управления формой НЧС, дана на рис. 8.

Принципиально важной для реализации предлагаемого принципа управления формой НЧС является начальная форма сигнала, которая задается характеристиками электромагнитного поля импульса лазера (ИЛ). В данной статье ограничимся случаем, когда форма ИЛ моделируется опять-таки гауссовой функцией. Разные лазеры дают ИЛ приблизительно такой формы с длительностью от 3 фс до 300 пс [40]. К сожалению, конкретный тип лазера дает импульс только определенной длительности.

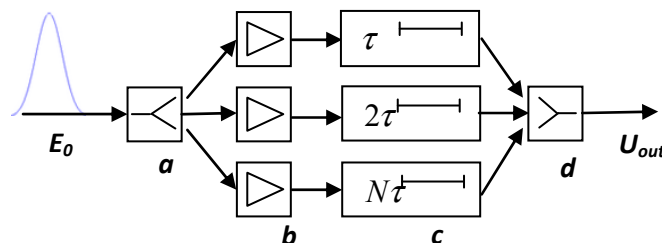


Рис. 8. Принципиальная схема устройства воспроизведения оптического сигнала с НЧС заданной формы

E_0 – импульс лазера (ИЛ); а – оптический демультиплексор (сплиттер); б – оптические усилители; с – прецизионные линии задержки; d – оптический мультиплексор (сумматор); U_{out} – оптический сигнал на выходе устройства

Устройства, построенные по принципу рис. 8 позволяют решать задачу управления несколькими параметрами НЧС оптических сигналов, в том числе и их начальной длительностью. По крайней мере, это справедливо, если ИЛ имеет форму гауссова импульса. Общая идея заключается в том, что гауссов импульс можно использовать как некоторый аналог функции отсчетов по теореме Найквиста-Котельникова [41]. Данное положение иллюстрирует рис. 9, где показана аппроксимация прямоугольного импульса суммой сдвинутых гауссовых импульсов.

Как видно из рис. 9, уже при небольшом количестве отсчетов в виде гауссовых импульсов (порядка 64) спектр сигнала воспроизводится практически идеально. Прямоугольный импульс является одним из самых «неудобных» с точки зрения точности аппроксимации гауссовыми импульсами из-за краевых эффектов на его границах. Но если есть возможность аппроксимации гауссовыми импульсами прямоугольного импульса, то отсюда следует, что эти же гауссовы импульсы можно использовать для аппроксимации *любой* гладкой функции. Это положение непосредственно следует из определения интеграла Римана.

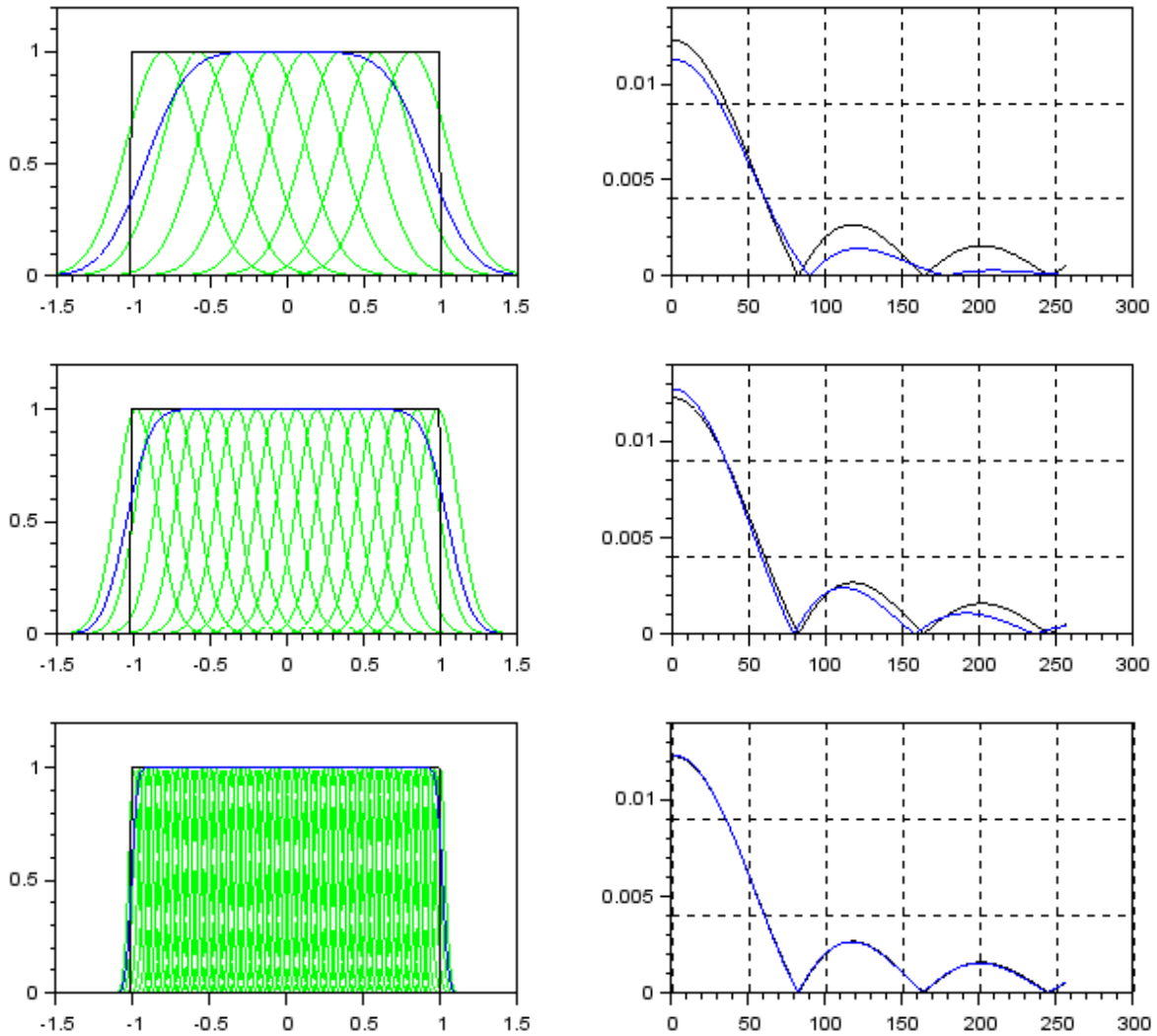


Рис. 9. Аппроксимация прямоугольного импульса пачками импульсов гауссовой формы
 Слева – аппроксимация во временной области, справа – аппроксимация в частотной области.
 Сверху вниз: аппроксимация 8-ю гауссовыми импульсами, аппроксимация 16-ю гауссовыми импульсами, аппроксимация 64-я гауссовыми импульсами

Доказательство возможности аппроксимации гладких функций последовательностями гауссовых импульсов одинаковой длительности основано на следующем предложении [37].

Теорема 4 (об аппроксимации единицы). При определенном выборе параметров A, τ, σ последовательность функций

$$f_M(t) = A \sum_{-M}^M \exp \left[-\frac{(t - m\tau)^2}{2\sigma^2} \right] \tag{89}$$

поточечно сходится к функции $f(t) = \text{rect}[-1,1]$ при $M \rightarrow \infty$.

Из поточечной сходимости следует сходимость в метриках L_1 и L_2 в выражении (89) при неограниченном возрастании числа отсчетов M . Из теоремы 4 следует, что для НЧС сигнала общего вида имеет местно сходимость на интервале $\pm \Delta T$:

$$U_M(t) = A \sum_{-M}^M U(m\tau) \exp \left[-\frac{(t - m\tau)^2}{2\sigma^2} \right] \rightarrow U(t), \quad M\tau = \Delta T, \tag{90}$$

где A – размерностный коэффициент, выбираемый из условий минимума ошибки аппроксимации, а также из условия баланса энергий.

Скорость сходимости рядов (90) зависит от свойств аппроксимируемой функции $U(t)$, а также от выбора параметров импульсов отсчетов. Расчеты показывают, что хороший вариант выбора параметра $\sigma = \Delta T / M$. Для такого варианта аппроксимация различных функций при $M = 13$ дана на рис. 10.

Оценки точности аппроксимации для функций, представленных на рис. 10 даны в таблице 3, из которой видно, что лучшее приближение при любом количестве импульсов отсчетов получается опять-таки

для гауссовой функции.

Таблица 3

Относительные ошибки аппроксимации различных функций гауссовыми импульсами отсчетов

M	$\text{rect}[-1,1](1-t^2)$	$\text{rect}[-1.5,1.5]\text{sinc}(2\pi)$	$\exp(-4t^2)$
10	8,0379E-03	7,9372E-02	4,8660E-03
50	7,6528E-05	1,6681E-04	2,0916E-05
100	4,2279E-05	1,0716E-04	1,5541E-05

Реализация принципа воспроизведения сигналов, показанная на рис. 8, требует выполнения условия ограничения РШС сигнала. Действительно, на входе устройства ИЛ должны иметь весьма короткую длительность, следовательно, значительную ширину в спектральной области. Положим, что длительность ИЛ приблизительно в 100 раз меньше, чем РДС аппроксимируемого сигнала (таблица 3). Соответственно, РШС ИЛ на входе устройства будет приблизительно в 100 раз больше, чем допускает ширина полосы пропускания канала передачи. Аппроксимация рядом (90) с точки зрения теории сигналов означает, что функция $U(t)$ приближается пачкой импульсов гауссовой формы, амплитуды которых модулируются значениями функции $U(t)$ в точках $\pm m\tau, m = 0, 1, \dots, M$. Можно ли утверждать, что при соответствующем выборе параметров аппроксимирующего ряда (90) его РШС будет в допустимых границах? В частных случаях можно, что мы сейчас покажем на примере гауссова сигнала.

Далее понадобится следующее вспомогательное предложение.

Лемма о квадрате суммы. Пусть имеется сумма неотрицательных чисел $Q = a_1 + a_2 + \dots + a_M$,

$a_m \geq 0, m = 1, \dots, M$. Тогда найдется такое число $\gamma: 1 \leq \gamma \leq 2$, что $Q^2 = \gamma \sum_{m=1}^M a_m^2$.

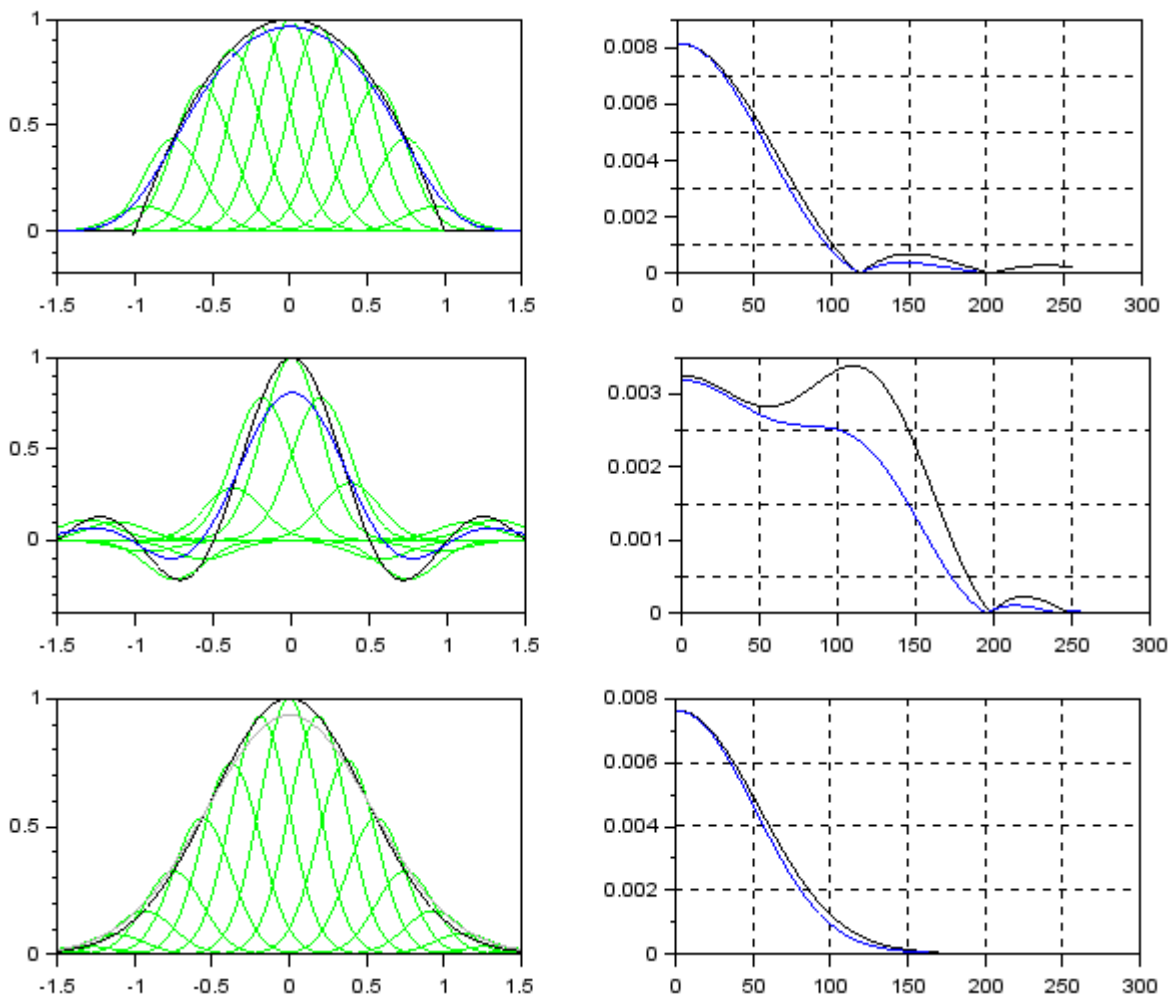


Рис. 10. Аппроксимация 13-ю гауссовыми импульсами различных функций
 Слева – аппроксимация во временной области, справа – аппроксимация в частотной области;
 сверху вниз аппроксимируемые функции: $\text{rect}[-1,1](1-t^2)$, $\text{rect}[-1.5,1.5]\text{sinc}(2\pi)$, $\exp(-4t^2)$

В самом деле, из неравенства Юнга следует, что $Q^2 \leq 2 \sum_{m=1}^M a_m^2$. С другой стороны, очевидно, что

$$Q^2 \geq \sum_{m=1}^M a_m^2 Q^2, \text{ то есть } \sum_{m=1}^M a_m^2 \leq Q^2 \leq 2 \sum_{m=1}^M a_m^2, \text{ что и доказывает лемму.}$$

Положим, что сигнал гауссовой формы аппроксимируется рядом (90) взвешенных гауссовых импульсов (модулированной пачкой коротких импульсов лазера). Аппроксимация выполняется на интервале $\pm \Delta T$. Параметры аппроксимируемого сигнала выбираются по правилу « N сигм», $N \geq 3$. Соответственно, параметр β аппроксимируемого сигнала

$$U(t) = B \exp\left(-\frac{t^2}{2\beta^2}\right) \quad (91)$$

отвечает условию $\beta = \Delta T / N$. Пусть функция отсчетов (в прикладном плане – импульс лазера) дана в виде: $u_0(t) = A \exp(-t^2 / 2\sigma^2)$. Тогда аппроксимирующий ряд имеет, соответственно, вид:

$$U_M(t) = \sum_{m=-M}^M U(m\tau)u_0(t - m\tau) = AB \sum_{m=-M}^M \exp\left(\frac{m^2\tau^2}{\beta^2}\right) \exp\left[-\frac{(t - m\tau)^2}{\sigma^2}\right], \quad (92)$$

где τ – относительный шаг линий задержки по рис. 8. В данной модели $\tau = \Delta T / M$. При этом $M \gg N$. Далее принимаем для импульсов отсчетов параметр $\sigma = \tau$. В этих условиях справедливо следующее предложение.

Теорема 5 (о сжатии спектров). В сформулированных выше условиях аппроксимируемый сигнал $U(t)$ и аппроксиманта $U_M(t)$ имеют одну и ту же эффективную ширину спектра, если их энергии одинаковы. Докажем это предложение.

Применяя табличные интегралы [33,36] получаем выражение для энергии сигнала $U(t)$:

$$E_U = \int_{-\infty}^{\infty} U^2(t) dt = \frac{B^2 \sqrt{\pi}}{\beta}. \quad (93)$$

Применяя Лемму о квадрате суммы, получим после несложных тождественных преобразований выражение для энергии аппроксиманты:

$$E_M = \int_{-\infty}^{\infty} U_M^2(t) dt = \frac{A^2 B^2 \sqrt{\pi}}{\sigma} \gamma Q, \quad 1 \leq \gamma \leq 2, \quad Q = \sum_{m=-M}^M \exp\left(-\frac{m^2 \sigma^2}{\beta^2}\right). \quad (94)$$

С учетом сформулированных условий параметры аппроксимируемого сигнала $U(t)$ и импульса отсчетов $u_0(t)$ находятся в соответствии: $\beta = \frac{M}{N} \sigma$, $\sigma = \frac{N}{M} \beta$. Тогда выражение (94) можно представить в виде:

$$E_M = \frac{A^2 B^2 \sqrt{\pi}}{\beta} \frac{M}{N} \gamma Q, \quad 1 \leq \gamma \leq 2, \quad Q = \sum_{m=-M}^M \exp\left(-\frac{m^2 N^2}{M^2}\right). \quad (95)$$

Сравнивая выражения для энергий (93) и (95) получим, что условие их равенства $E_U = E_M$ требует, чтобы размерностный коэффициент A отвечал требованию:

$$A^2 = \frac{N}{M} \frac{1}{\gamma Q}. \quad (96)$$

Далее, не снижая общности доказательства, будем полагать энергии единичными: $E_U = E_M = 1$. Тогда спектральная плотность и эффективная ширина спектра для сигнала $U(t)$ будут:

$$G_U(\omega) = B\beta\sqrt{2\pi} \exp\left(-\frac{\omega^2 \beta^2}{2}\right), \quad \Delta\Omega_U^2 = \frac{B^2 \sqrt{\pi}}{2\beta}. \quad (97)$$

Для аппроксиманты с учетом теоремы запаздывания получим выражение для спектральной плотности:

$$G_M = AB\sigma\sqrt{2\pi} \exp\left(-\frac{\omega^2 \sigma^2}{2}\right) \sum_{m=-M}^M \exp(-j\omega m\sigma) \exp\left(-\frac{m^2 N^2}{2M^2}\right). \quad (98)$$

Применяя лемму о квадрате суммы, получим из выражения (98) формулу для эффективной ширины спектра аппроксиманты:

$$\Delta\Omega_M^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 G_M^2(\omega) d\omega = \frac{A^2 B^2 \sqrt{\pi}}{2\sigma^2} \gamma Q = \frac{B^2 \sqrt{\pi}}{2\beta} A^2 \frac{M}{N} \gamma Q, \quad Q = \sum_{m=-M}^M \exp\left(-\frac{m^2 N^2}{M^2}\right). \quad (99)$$

Сравнивая выражения (97) и (99) и учитывая условие равенства энергий (96) получим, что $\Delta\Omega_M^2 = \Delta\Omega_U^2$. Тем самым, теорема доказана.

Прикладной смысл теоремы 5 заключается в том, что имеется принципиальная возможность пачками импульсов с весьма широким спектром формировать суммарный сигнал по схеме рис. 8 с достаточно узким спектром для передачи по узкополосным каналам.

Проблематичным, однако, оказывается реализация системы линий задержки с прецизионным шагом. Здесь важен анализ параметров. Если положить, как это обычно и делается, что база импульса имеет порядок единицы, то для сигнала в полосе порядка 100 ГГц начальная длительность импульса будет иметь порядок 10 пс. Для гауссова импульса, как показано выше, база еще меньше. То есть, мы говорим о начальных длительностях оптических импульсов порядка 1-10 пс. При аппроксимации заданной формы сигнала с большой точностью (табл. 3) надо использовать 50-100 импульсов отсчетов. Соответственно, относительная задержка τ должна иметь порядок 10-100 фс.

Один из возможных методов реализации таких систем линий задержки дан в работах [38, 39]. Суть метода заключается в использовании линий задержки в виде коротких отрезков ОВ одинаковой физической длины с различными параметрами сердцевины. Точнее, с разной групповой скоростью распространения сигнала в ОВ. Данного результата можно достичь прецизионным легированием состава сердцевины ОВ различными добавками. Для определения концентрации добавок важным является решения задачи установления зависимости групповой скорости, как от состава материала сердцевины ОВ, так и от частоты. В качестве исходных данных использована трехчленная формула Селмейера для коэффициента преломления [43]. Графики зависимостей группового коэффициента преломления и групповой скорости для разных составов материала ОВ представлены на рис. 11 и рис. 12.

В данном случае рассматривается только легирование основного состава SiO₂ добавками двуокиси германия GeO₂. Метод структурной идентификации по малой выборке [42] двухпараметрической зависимости группового коэффициента преломления от частоты и концентрации легирующих добавок дает в данном случае следующую модель:

$$n_{gr}(\omega, \mu) = 1,5035E+00 - 6,6031E-05 \cdot \omega + 3,2447E-08 \cdot \omega^2 - 4,6630E-12 \cdot \omega^3 + \\ + (1,2998E-01 + 2,1283E-05 \cdot \omega + 7,6240E-09 \cdot \omega^2 + 1,9426E-12 \cdot \omega^3) \mu + \\ + (-7,0069E-01 + 8,7468E-04 \cdot \omega - 3,8480E-07 \cdot \omega^2 + 6,1189E-11 \cdot \omega^3) \mu^2, \quad (100)$$

где значения частоты ω имеют размерность Трад/с, а параметр μ концентрации GeO₂ берется как массовая доля (процентное содержание, разделенное на 100).

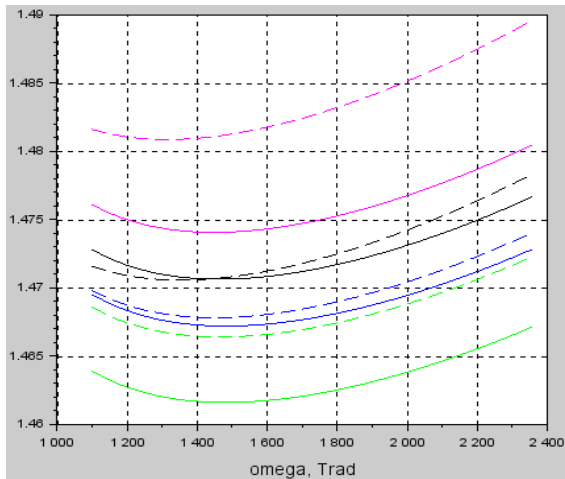


Рис. 11. Зависимость группового коэффициента преломления от частоты и содержания примеси GeO₂ (чем выше график, тем больше содержание примеси: 0%, 3,1%, 3,5%, 4,1%, 5,8%, 7,0%, 7,9%, 13,5%)

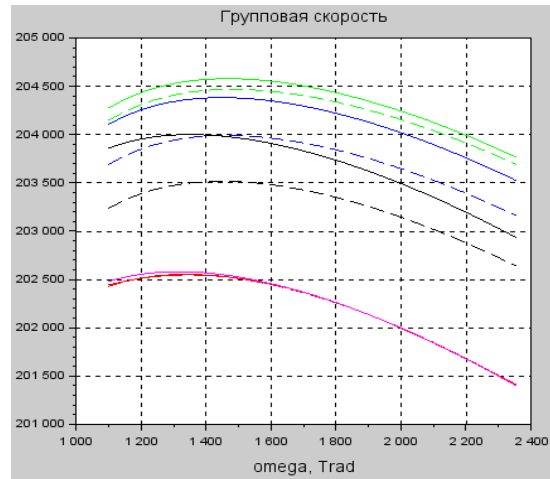


Рис. 12. Зависимость групповой скорости от частоты и содержания примеси GeO₂ (чем ниже график, тем больше содержание примеси: 0%, 3,1%, 3,5%, 4,1%, 5,8%, 7,0%, 7,9%, 13,5%)

Положим, что все линии задержки имеют одинаковую длину L , а шаг задержки τ регулируется легирующими добавками. С учетом порядков величин в формуле (100) можно ограничиться линеаризованной зависимостью относительного шага приращения задержки:

$$\tau = \frac{L}{c} n_{gr}(\omega_0, \mu_0 + \Delta\mu) - \frac{L}{c} n_{gr}(\omega_0, \mu_0) \approx \frac{L}{c} \frac{dn_{gr}(\omega_0, \mu_0)}{d\mu} \Delta\mu, \quad (101)$$

где ω_0 – фиксированная частота; μ_0 – центральное значение концентрации легирующих добавок; $\Delta\mu$ – малое приращение концентрации относительно центрального значения.

Для конкретного примера положим центральное значение концентрации 5% ($\mu_0 = 0,05$). После дифференцирования зависимости (100) получим расчетную формулу:

$$\tau(\omega_0, \mu_0) = (5,9912E-02 + 1,0875E-04 \cdot \omega_0 - 3,0856E-08 \cdot \omega_0^2 + 8,0615E-12 \cdot \omega_0^3) \cdot \Delta\mu. \quad (102)$$

Результаты расчетов по формуле (102) приведены в таблицах 4 и 5. Анализ этих таблиц показывает следующее. Требуемый шаг τ задержек 100 фс (10^{-13} с) обеспечивается на длине линий порядка 0,3 м приращением концентрации GeO₂ порядка 1%. Точность легирования при этом должна составлять 0,01%.

Таблица 4

Значения шага задержки τ для длины волны 1530 нм ($\omega_0 = 1232$ Трад/с)

$\Delta\mu$	Шаг задержки на длине линий L , м				
	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0
0,01	1,6213E-13	5,4044E-13	1,6213E-12	5,4044E-12	1,6213E-11
0,001	1,6213E-14	5,4044E-14	1,6213E-13	5,4044E-13	1,6213E-12
0,0001	1,6213E-15	5,4044E-15	1,6213E-14	5,4044E-14	1,6213E-13
0,00001	1,6213E-16	5,4044E-16	1,6213E-15	5,4044E-15	1,6213E-14

Таблица 5

Значения шага задержки τ для длины волны 1570 нм ($\omega_0 = 1911$ Трад/с)

$\Delta\mu$	Шаг задержки на длине линий L , м				
	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0
0,01	1,5995E-13	5,3317E-13	1,5995E-12	5,3317E-12	1,5995E-11
0,001	1,5995E-14	5,3317E-14	1,5995E-13	5,3317E-13	1,5995E-12
0,0001	1,5995E-15	5,3317E-15	1,5995E-14	5,3317E-14	1,5995E-13
0,00001	1,5995E-16	5,3317E-16	1,5995E-15	5,3317E-15	1,5995E-14

Такие параметры вполне достижимы при существующей технологии изготовления ОВ методом осаждения из газообразной смеси. В таблицах 4 и 5 даны значения для длин волн, отличающихся на 40 нм. В окрестности окна прозрачности 1550 нм это соответствует ширине полосы 4ТГц. В эту полосу полностью укладывается 40 частотных каналов шириной 100 ГГц по частотному плану G.692 [12]. При этом для крайних значений длин волн различие шага задержки не превышает 2%. Таким образом, предлагаемый метод обеспечивает достаточную широкополосность в области отдельной несущей.

10. Метод распознавания оптических сигналов в частотной области

Тождество (45) показывает, что энергетический спектр является устойчивой характеристикой оптического сигнала по отношению к материальной дисперсии. Конечно, форма энергетического спектра на стороне приема будет зависеть и от неравномерности коэффициента затухания по частоте. Более того, показано, что неравномерность коэффициента затухания приводит к дополнительному увеличению длительности оптического импульса [11]. Ограничиваясь рассмотрением узкополосной ВОСП, будем пренебрегать этими эффектами.

Идея метода распознавания сигналов в частотной области сводится к сравнению спектра сигнала на входе приемного устройства с опорным спектром [15]. Принципиальная схема устройства, реализующего данный метод, дана на рис. 13.

На рис. 13 компонент в виде дифракционной решетки (ДР) показан условно. На самом деле необходим компонент, выделяющий составляющие энергетического спектра с очень высокой разрешающей способностью.

Ориентировочно можно считать, что в окне прозрачности 1550 нм полоса частот 100 ГГц канала STM-16 соответствует полосе в области длин волн порядка 1 нм. Для различения спектров разных ОИ требуется разрешающая способность, которая позволила бы выделить 50...100 энергетических компонент спектра. То есть, разрешающая способность устройства, названного на рис. 13 ДР, должна иметь порядок 0,01 нм, или примерно 10 пм.

Даже прецизионные ДР с количеством линий порядка 10000 на один миллиметр далеки от возможности такого разрешения. В то же время, принципиальная возможность решения данной задачи уже обеспечена технологически. Например, серийно выпускаемый портативный спектрометр [44] обеспечивает разрешающую способность порядка 15 пм. Таким образом, принципиальная возможность разрешения алфавитов сигналов по таблице 2 существует при современном уровне развития техники.

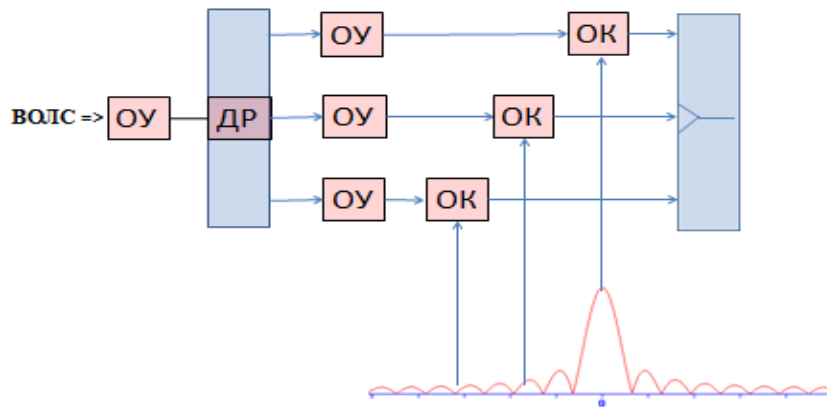


Рис. 13. Принцип различия ОИ в частотной области:
 ОУ – оптический усилитель; ОК – оптический компаратор; ДР – дифракционная решетка

11. Передача алфавитов оптических сигналов в сверхширокополосных системах

Применение метода сигнального уплотнения в сверхширокополосных системах передачи, когда используется весь доступный оптический диапазон от 0,8 мкм до 1,8 мкм (приблизительно от 165 ТГц до 375 ТГц) требует учета эффекта существенной относительной задержки энергетических центров импульсов за счет разницы групповых скоростей. В модели зависимости коэффициента преломления от частоты групповая скорость определяется:

$$V_{gr}(\omega) = c / n_{gr}(\omega), \quad n_{gr}(\omega) = n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}, \quad (103)$$

где $n_{gr}(\omega)$ – зависимость группового показателя преломления от частоты.

В линейном приближении относительная задержка энергетических центров импульсов с разнесенными несущими на величину $\Delta\omega$ на расстоянии z будет определяться выражением:

$$\Delta t(z, \Delta\omega, \omega_0) = z \left(\frac{1}{V_{gr}(\omega_0)} - \frac{1}{V_{gr}(\omega_0 + \Delta\omega)} \right) \approx z \Delta\omega dV(\omega_0), \quad dV(\omega_0) = \frac{1}{V_{gr}^2(\omega_0)} \frac{dV_{gr}(\omega_0)}{d\omega}, \quad (104)$$

где $dV(\omega_0)$ – удельный коэффициент дисперсии групповых скоростей (УКДГС)

Пример зависимости УКДГС для одного из вариантов состава кварцевого стекла представлен на рис. 14. Анализ этого графика показывает, что порядок УКДГС может достигать по модулю значений 10...40 пс/(ТГц*км), то есть порядка 1...4 единиц в расчете на ширину узкополосного частотного канала шириной 100 ТГц, что дает для средних частот диапазона примерно 0,8...3,6 пс/(нм*км). По сравнению с типичными значениями материальной дисперсии 3...20 пс/(нм*км) [13] это значение можно считать малым.

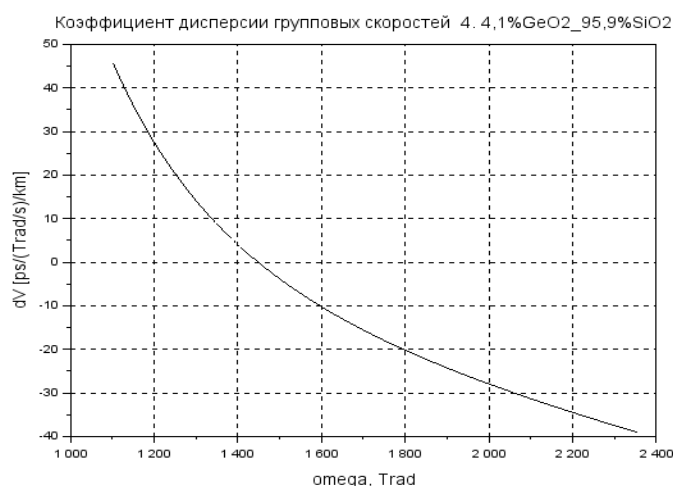


Рис. 14. Зависимость УКДГС от частоты

В то же время, в случае разнесения несущих частот на 10...100 ТГц эффект «гонок» за счет разницы групповых скоростей оказывается преобладающим с точки зрения скорости передачи информации.

Учет этого эффекта в сверхширокополосных системах передачи очевидно требует:

- организации различных логических каналов для существенно различных несущих;
- промежуточной буферизации в точках регенерации потоков данных, передаваемых в различных

логических каналах с разной групповой скоростью;

- или, как вариант, продления логических каналов по всей трассе передачи.

Теоретически возможен способ передачи данных из разных логических каналов с чередованием несущих на последующих регенерационных участках. Однако такой способ на практике потребует приблизительно равных длин регенерационных участков, что едва ли осуществимо для уже созданных систем передачи.

Вместе с тем, имеется возможность уравнивания дисперсий в зеркальных частотных каналах, которые могут быть объединены в один логический канал передачи. При этом спектральную плотность в одном логическом канале можно удвоить (рис. 15). Здесь линия 1 – изолиния равных групповых скоростей; линии 2 и 3 – абсциссы зеркальных частот равных групповых скоростей.

Уплотнение сигнальным методом требует решения принципиально разных задач для узкополосных сигналов и сигналов, значительно разнесенных по частоте. Практическая реализация предлагаемых решений (разработка канального плана и сигнального плана) требует также учета неравномерности коэффициента затухания по частоте и других существенных факторов.

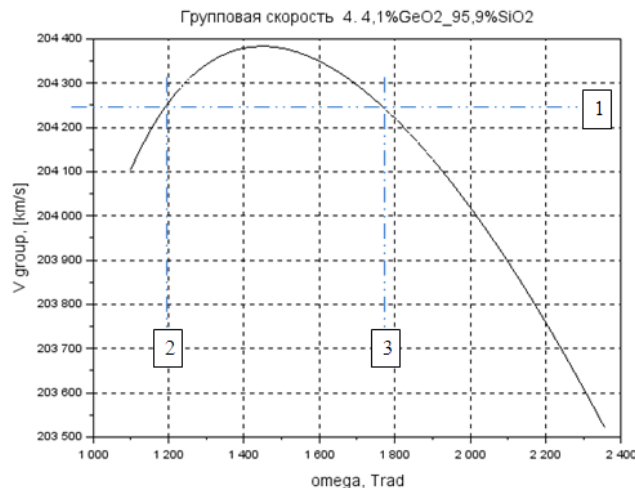


Рис. 15. Зависимость групповой скорости от частоты

Интересно, что эффект «гонок» групповых скоростей можно использовать для повышения энергетической эффективности ВОСП. В самом деле, суммирование энергий импульсов на стороне передачи из большого числа частотных каналов может привести к недопустимым эффектам на входе в ОВ. Могут сказаться нелинейные эффекты, а мгновенная мощность вообще может оказаться столь большой, что волокно просто расплавится. Идея уменьшения этих эффектов сводится к распределению импульсов из разных логических каналов во временной области таким образом, чтобы на стороне передачи импульсы в одном такте были разнесены так, чтобы на сторону приема они пришли бы примерно в один момент времени. Поскольку на стороне приема энергия суммарного сигнала пренебрежимо мала по сравнению с его энергией на стороне передачи, такой метод может дать положительные эффекты в реальных ВОСП.

Заключение

В заключение следует поклониться гению великого ученого Карла Фридриха Гаусса (1777-1855), который, кроме математических открытий сделал, пожалуй, первое изобретение в области электросвязи – изобрел электрический телеграф. Мы же здесь представляем довольно скромные результаты, основанные на его теоретических представлениях. К таким результатам, возможно, обладающим свойством небольшой научной новизны, отнесем:

- введены и обоснованы показатели расчетной длительности импульса, расчетной ширины спектра и расчетной базы импульса;
- дано доказательство минимальности базы гауссова импульса;
- введен и обоснован показатель приведенной базы, который учитывает устойчивость энергетического спектра сигнала к материальной дисперсии;
- дано доказательство минимальности приведенной базы гауссова импульса;
- дан сравнительный анализ дисперсионного удлинения гауссовых импульсов и импульсов Найквиста-Котельникова;
- показан конкретный вариант сигнального уплотнения ВОСП с использованием алфавитов гауссовых импульсов с амплитудной модуляцией и частотной манипуляцией;
- дано доказательство теорем, обосновывающих возможность формирования вторичных алфавитов сигналов на основе первичных алфавитов, что позволяет существенно увеличить спектральную эффективность ВОСП;
- дано доказательство теоремы о сжатии спектра пачки гауссовых импульсов;
- обоснована принципиальная возможность повышения скорости передачи данных ВОСП примерно в 8 раз при использовании существующих ЛКС;

- разработан метод синтеза моделей зависимостей различных функций коэффициента преломления от частоты и состава легирующих добавок;
- показана принципиальная возможность реализации метода распознавания оптических сигналов в частотной области;
- показана возможность передачи данных в сверхширокополосных ВОСП с учетом эффекта «гонок» групповых скоростей.

Автор выражает благодарность своим коллегам-соавторам, которые приняли участие в ряде цитируемых публикаций, выполнив расчеты с использованием платформы SciLab.

Литература

1. BigData шагает по планете. Количество данных в мире удваивается каждые два года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rg.ru/2013/05/14/infa-site.html>.
2. Информационный взрыв [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Информационный_взрыв.
3. Информация по Шеннону [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://economy-ru.info/info/192695>.
4. Total Traffic Statistics. Live statistics showing total aggregate volume of all parties connected to AMS-IX. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://stats.ams-ix.net/index.html>.
5. Оптикон Украина: SDH / PDH / E1 оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://optokon.ua/catalog/sdh-pdh-e1>.
6. Скидин А.С. Разработка эффективных методов кодирования для повышения пропускной способности современных линий волоконно-оптической связи : дисс. ... канд. физ.-мат. наук / А.С. Скидин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-effektivnykh-metodov-kodirovaniya-dlya-povysheniya-propusknoi-sposobnosti-sovreme>.
7. Патент РФ № 0002572363 Волоконно-оптическая система связи [Электронный ресурс / В.И. Терешков, О.Е. Наний, В.В. Гайнов, А.Г. Новиков. – 10.01.2016. – Режим доступа : <https://edrid.ru/rid/216.013.9f16.html>.
8. Тихвинский В.О. Спектральная эффективность систем мобильной связи [Электронный ресурс] / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, В.И. Минаев. – Режим доступа : <https://refdb.ru/look/1684753.html>.
9. 20 Tbit/s transmission over 6860 km with sub-Nyquist channel spacing / J. Cai, C.R. Davidson, A. Lucero et al. // *Journal of Lightwave Technology*. – 2012. – Vol. 30. – P. 651–657.
10. Установлен новый рекорд скорости передачи данных по оптоволокну [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.dailytechinfo.org/infotech/10161-ustanovlen-novyuy-rekord-po-skorosti-peredachi-dannyh-po-optovoknu.html>.
11. Одегов Н.А. Операторы дисперсии и согласованные оптические сигналы / Н.А. Одегов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 5. – С. 211–220.
12. Макаров Т.В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи / Макаров Т.В. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2009. – 220 с.
13. Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация : монография. / О.В. Бондаренко, Д.В. Иоргачев, А.Ф. Данченко, А.В. Усов. – Одесса : Астропринт, 2000. – 536 с.
14. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М. : Мир, 1996. – 323 с.
15. Одегов М.А. Метод розрізнення оптичних сигналів в частотній області / М.А. Одегов, О.П. Младінов // Матеріали 72-ї наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів, 13-15 грудня 2017 р., Одеса. – С. 53–55.
16. Скларов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Скларов. – М. : СОЛОН-пресс, 2009. – 272 с.
17. Marcelo A. S. Optical sinc-shaped Nyquist pulses of exceptional quality / Marcelo A. Soto., Mehdi Alem, Mohammad Amin Shoaie, Armand Vedadi, Camille-Sophie Bres, Luc Thevenaz & Thomas Schneider – *NATURE COMMUNICATIONS* | 4:2898 | DOI: 10.1038/ncomms3898: Macmillan Publishers Limited – 2013, pp. 1–11.
18. Бурдин В.А. Компенсация хроматической дисперсии на регенерационных участках линий передачи сетей связи / В.А. Бурдин // *Электросвязь*. – 2006. – № 7. – С. 28–33. – ISSN 0013-5771
19. Одегов Н.А. Передача информации оптическими импульсами равной дисперсии / Н.А. Одегов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2017. – № 2. – С. 28–38.
20. Staschuk O. Method of determining the length of the amplifying section by four-wave mixing for the line based on the standard fiber / O. Staschuk, D. Bahachuk, I. Slobodianiuk, O. Yurieva // *Proceedings of the O.S. Popov ONAT*. – Odessa, 2017. – № 2. – С. 39–47.
21. Решетникова О.С. Оценка влияния фазовой самомодуляции на качество каналов ВОСП СРК с прямой модуляцией / О.С. Решетникова // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2012. – № 1. – С. 158–166.
22. Корнейчук В.И. Оптические системы передачи / В.И. Корнейчук, Т.В. Макаров, И.П. Панфилов. – Київ : Техніка, 1994. – 388 с.
23. Харкевич А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М. : Книжный дом «ЛИБКОМ», 2009. – 240 с.

24. Атомные часы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.
25. Мазур А.Д. Оценка параметров качества оптической системы передачи с поляризационным мультиплексированием / А.Д. Мазур, В.В. Педаш // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2018. – № 1. – С. 61–67.
26. Одегов Н.А. Передача информации оптическими импульсами равной длительности в условиях дисперсии высших порядков / Н.А. Одегов // Проблемы инфокоммуникаций. – Минск : Белорусская государственная академия связи, 2018. – № 1. – С. 5–12.
27. Одегов Н.А. Сверхширокополосная передача информации в волоконно-оптических линиях сигналами равной дисперсии / Н.А. Одегов // Матеріали 72-ї наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів 13-15 грудня 2017 р., Одеса. – С. 57–60.
28. Сукачев Э.А. Введение в теорию сигналов Найквиста / Э.А. Сукачев. – Одесса : Освіта України, 2016. – 108 с.
29. Одегов Н.А. Тестовые сигналы и показатели в задачах исследования материальной дисперсии / Н.А. Одегов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова – 2017. – № 1. – С. 124–131.
30. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов / Варакин Л.Е. – М. : Советское радио, 1970. – 376 с.
31. Вентцель Е.С. Теория вероятностей : учеб. для вузов / Вентцель Е.С. – 6-е изд. стер. – М. : Высшая школа, 1999. – 576 с.
32. Ширяев А.Н. Вероятность / Ширяев А.Н. – М. : Наука, 1980. – 576 с.
33. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Элементарные функции / Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. – М. : Наука, 1981. – 800 с.
34. Иванов В.А. Теория оптимальных систем автоматического управления / В.А. Иванов, Н.В. Фельдин. – М. : Наука, 1981. – 336 с.
35. Дифференциальные уравнения онлайн [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://math24.biz/differential_equation.
36. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 1100 с.
37. Odegov N.A. Formation of a low-frequency component of an optical signal by pulses of a gaussian form / N.A. Odegov, D.M. Stepanov // Information and Telecommunication Sciences, 2018, Volume 9, Number 1: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» – P. 26–33. – ISSN 2312-4121
38. Odegov N.A. Formation of picosecond optical pulses of the assigned structure using precision lines of delay // N.A. Odegov, I.V. Starenkiy, V.V. Kostjuk ISSN 0131-8675 / Proceeding of the O.S. Popov ONAT. – 2018. – № 1. – P. 34–43.
39. Одегов Н.А. Методика синтеза моделей зависимостей дисперсионных характеристик от частоты и состава оптического волокна / Н.А. Одегов, А.А. Грушенко, В.В. Костюк, Р.С. Резник Р.С. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2018. – № 1. – С. 68–76.
40. Теория синхронизации мод [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://laserportal.ru/content_890.
41. Котельников В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи / В.А. Котельников // Всесоюзный энергетический комитет : материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. – 1933.
42. Левин С.Ф. Интерполяционная фильтрация статистических характеристик случайных функций методом максимума компактности / С.Ф. Левин, Н.А. Одегов. – М. : АН СССР. – Вопросы кибернетики, ВК – 94, 1982. – С. 71–77.
43. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр. – М. : Радио и связь, 1989. – 504 с.
44. Компактный спектрометр для контроля длины волны лазеров и диодов. Модель S150 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://solarlaser.com/ru/products/compact-spectrometers/compact-spectrometer-for-laser-wl-measurement-model-s150/>

References

1. BigData shagaet po planete. Kolichestvo dannyx v mire udvaivaetsya kazhdye dva goda [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://rg.ru/2013/05/14/infa-site.html>.
2. Informacionnyj vzryv [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Informacionnyj_vzryv](https://ru.wikipedia.org/wiki/Informacionnyj_vzryv).
3. Informaciya po Shennonu [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://economy-ru.info/info/192695>.
4. Total Traffic Statistics. Live statistics showing total aggregate volume of all parties connected to AMS-IX. [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://stats.ams-ix.net/index.html>.
5. Optokon Ukraina: SDH / PDH / E1 oborudovanie [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://optokon.ua/catalog/sdh-pdh-e1>.
6. Skidin A.S. Razrabotka effektivnykh metodov kodirovaniya dlya povysheniya propusknok sposobnosti sovremennykh linij volokonno-opticheskoy svyazi / A.S. Skidin // Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-effektivnykh-metodov-kodirovaniya-dlya-povysheniya-propusknok-sposobnosti-sovreme>.
7. Treshnikov V.I. Volokonno-opticheskaya sistema svyazi / V.I. Tereshkov, O.E. Naniy, V.V. Gajnov, A.G. Novikov // Patent RF № 0002572363 ot 10.01.2016 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://edrid.ru/rid/216.013.9f16.html>.
8. Tixvinskij V.O. Spektralnaya effektivnost sistem mobilnoj svyazi V.O. Tixvinskij, S.V. Terentev, V.I. Minaev – [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://refdb.ru/look/1684753.html>.
9. 20 Tbit/s transmission over 6860 km with sub-Nyquist channel spacing / J. Cai, C.R. Davidson, A. Lucero et al. // Journal of Lightwave Technology. – 2012. – Vol. 30. – P. 651–657.

10. Ustanovlen novyj rekord skorosti peredachi dannyx po optovoloknu [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.dailytechinfo.org/infotech/10161-ustanovlen-novyj-rekord-po-skorosti-peredachi-dannyh-po-optovoloknu.html>.
11. Odegov N.A. Operatory dispersii i soglasovannye opticheskie signaly / N.A. Odegov // Herald of Khmelnytskyi National University. - 2017. - № 5. - S. 211-220.
12. Makarov T.V. Kogerentnye volokonno-opticheskie sistemy peredachi / Makarov T.V. – Odessa: ONAS im. A.S. Popova, 2009. – 220 s.
13. Bondarenko O.V. Volokonno-opticheskie kabeli. Teoreticheskie osnovy, konstruirovaniye i raschet, tekhnologiya proizvodstva i ekspluatatsiya: monografiya. / O.V. Bondarenko, D.V. Iorgachev, A.F. Danchenko, A.V. Usov. – Odessa, Astroprint, 2000. – 536 c.
14. Agraval G. Nelinejnaya volokonnaya optika / Agraval G. – M.: Mir, 1996. – 323 s.
15. Odegov M.A. Metod rozrznennya optichnix signaliv v chastotnij oblasti / M.A. Odegov, O.P. Mladinov // Materiali 72-ї nauk.-texn. konferencii profesorsko-vikladackogo skladu, naukovciv, aspirantiv ta studentiv 13-15 grudnya 2017 r., Odesa. - S. 53 - 55.
16. Sklyarov O.K. Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi / O.K. Sklyarov // M.: SOLON-press, 2009. – 272 s.
17. Marcelo A. S. Optical sinc-shaped Nyquist pulses of exceptional quality // Marcelo A. Soto., Mehdi Alem, Mohammad Amin Shoaie, Armand Vedadi, Camille-Sophie Bres, Luc Thevenaz & Thomas Schneider – NATURE COMMUNICATIONS | 4:2898 | DOI: 10.1038/ncomms3898: Macmillan Publishers Limited – 2013, pp. 1 – 11.
18. Burdin V.A. Kompensatsiya xromaticheskoy dispersii na regeneracionnyx uchastkax linij peredachi setej svyazi / Burdin V.A. // ISSN 0013-5771 // Elektrosvyaz. – № 7. – 2006. – S. 28–33.
19. Odegov M.A. Peredacha informacii opticheskimi impulsami ravnoj dispersii / N.A. Odegov // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova – 2017. – № 2. – S. 28–38.
20. Staschuk O. Method of determining the length of the amplifying section by four-wave mixing for the line based on the standard fiber / O. Staschuk, D. Bahachuk, I. Slobodianiuk, O. Yurivna // Proceedings of the O.S. Popov ONAT. – Odessa, 2017. – №2 – S. 39 – 47.
21. Reshetnikova O.S. Ocenka vliyaniya fazovoj samomoduljacii na kachestvo kanalov VOSP SRK s pryamoj moduljaciej // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova – 2012, – № 1 – С. 158–166.
22. Kornejchuk V.I. Opticheskie sistemy peredachi / V.I. Kornejchuk, T.V. Makarov, I.P. Panfilov // Kiiiv: Texnika, 1994. – 388 s.
23. Xarkevich A.A. Spektry i analiz / A.A. Xarkevich // M.: Knizhnyj dom «LIBKOM», 2009. – 240 s.
24. Atomnye chasy [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/Atomnye_chasy.
25. Mazur A.D. Ocenka parametrov kachestva opticheskoy sistemy peredachi s polarizacionnym multipleksirovaniem / A.D. Mazur, V.V. Pedyash // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova – 2018, № 1 – С. 61–67.
26. Odegov N.A. Peredacha informacii opticheskimi impulsami ravnoj dlitelnosti v usloviyax dispersii vysshix poryadkov / N.A. Odegov // Problemy infokommunikacij – Minsk: Belorusskaya gosudarstvennaya akademiya svyazi – 2018. – №1 – S. 5–12.
27. Odegov N.A. Sverxshirokopolosnaya peredacha informacii v volokonno-opticheskix liniyax signalami ravnoj dispersii / N.A. Odegov // Materiali 72-ї nauk.-texn. konferencii profesorsko-vikladackogo skladu, naukovciv, aspirantiv ta studentiv 13-15 grudnya 2017 r., Odesa. - S. 57 - 60.
28. Sukachev E.A. Vvedenie v teoriyu signalov Najkvista / E.A. Sukachev // Odessa: Osvita Ukraini, 2016. – 108 s.
29. Odegov N.A. Testovye signaly i pokazateli v zadachax issledovaniya materialnoj dispersii / N.A. Odegov // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova – 2017, № 1 – S. 124 – 131.
30. Varakin L.E. Teoriya slozhnyx signalov. – M.: Sovetskoe radio, 1970. – 376 s.
31. Ventcel E.S. Teoriya veroyatnostej: Ucheb. dlya vuzov. – 6-e izd. ster. – M.: Vysshaya shkola, 1999. — 576 c.
32. Shiryayev A.N. Veroyatnost. – M.: Nauka, 1980. – 576 s.
33. Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. Integraly i ryady. Elementarnye funkcii. – M: Nauka, 1981. – 800 s.
34. Ivanov V.A. Teoriya optimalnyx sistem avtomaticheskogo upravleniya / V.A. Ivanov, N.V. Feldin // M.: Nauka, 1981. – 336 s.
35. Differentsialnye uravneniya onlajn [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://math24.biz/differential_equation.
36. Gradshtejn I.S. Tablicy integralov, summ, ryadov i proizvedenij / I.S. Gradshtejn, I.M. Ryzhik. – M: GIFML, 1963. – 1100 s.
37. Odegov N.A. Formation of a low-frequency component of an optical signal by pulses of a gaussian form / N.A. Odegov, D.M. Stepanov // ISSN 2312-4121, Information and Telecommunication Sciences, 2018, Volume 9, Number 1: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» – P. 26 – 33.
38. Odegov N.A. Formation of picosecond optical pulses of the assigned structure using precision lines of delay // N.A. Odegov, I.V. Starenkiy, V.V. Kostjuk ISSN 0131-8675 / Proceeding of the O.S. Popov ONAT. – №1, 2018. – Odessa. – P. 34 – 43.
39. Odegov N.A. Metodika sinteza modelej zavisimostej dispersionnyx charakteristik ot chastoty i sostava opticheskogo volokna / N.A. Odegov, A.A. Grushenko, V.V. Kostyuk, R.S. Reznik R.S. // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova – 2018, № 1 – S. 68 – 76.
40. Teoriya sinxronizacii mod [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://laser-portal.ru/content_890.
41. Kotelnikov, V. A. O propusknoj sposobnosti efira i provoloki v elektrosvyazi / V.A. Kotelnikov // Vsesoyuznyj energeticheskij komitet: Materialy k I Vsesoyuznomu sezdru po voprosam texnicheskoy rekonstrukcii dela svyazi i razvitiya slabotochnoj promyshlennosti. — 1933.
42. Levin S.F. Interpoljacionnaya filtratsiya statisticheskix charakteristik sluchajnyx funkcij metodom maksimuma kompaktnosti / S.F. Levin, N.A. Odegov. – M.: AN SSSR. – Voprosy kibernetiki, VK – 94, 1982. – S. 71 – 77.
43. Gauer Dzh. Opticheskie sistemy svyazi / Dzh. Gauer. – M.: Radio i svyaz, 1989. – 504 s.
44. Kompaktnyj spektrometr dlya kontrolya dliny volny lazerov i diodov. Model S150 [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <https://solarlaser.com/ru/products/compact-spectrometers/compact-spectrometer-for-laser-wl-measurement-model-s150/>

onick_64@ukr.net
ORCID 0000-0001-5526-2487

Рецензія/Peer review : 25.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

УДК 621.396.6.019.3 : 620.172.21

Ю.М. БОЙКО, І.І. КОВТУН, С.В. ПЕТРАЩУК, Р.А. ТЕРТИЧНИЙ
Хмельницький національний університет**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ВИВОДІВ ДИСКРЕТНИХ КОМПОНЕНТІВ
НА ПЕРЕДАЧУ ДЕФОРМАЦІЙ ВІД ОБ'ЄДНУВАЛЬНОЇ ПЛАТИ**

Метою представленого дослідження є виявлення і оцінка впливу технології та способів монтажу електронних компонентів на виникнення та передачу напружень і деформацій в конструкціях об'єднувальної плати. В якості об'єктів дослідження були вибрані металокерамічні резистори ОМЛТ-0,125 встановлені на об'єднувальної платі за технологією наскрізного монтажу в трьох варіантах формування виводів. Для експериментального дослідження деформацій та напружень встановлених електронних компонентів було використано метод статичного випробування під дією зовнішнього механічного навантаження на згин та метод електротензометрії. З метою забезпечення ідентичності напружено-деформованого стану резисторів, змонтованих на об'єднувальної платі за вказаними технологіями формування виводів, випробування проводились навантаженням плати на розробленій установці за схемою чистого згину. Порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що запропонований спосіб високого наскрізного монтажу електронних компонентів на об'єднувальної платі дозволяє зменшити передачу деформацій від об'єднувальної плати до електронних компонентів, порівняно із технологією низького наскрізного та поверхневого монтажу.

Ключові слова: друкована плата, електронний компонент, паяне з'єднання, короблення, напруження, деформація.

J. BOIKO, I. KOVTUN, S. PETRASHCHUK, R. TERTYCHNY
Khmelnytsky National University**EFFECTS OF LEAD FORMING TECHNOLOGY FOR DISCRETE COMPONENTS TO STRAIN TRANSMISSION
FROM MAIN BOARD**

The main boards of electronic packages to be their main building blocks are likely to be exposed to variety of external impacts as in manufacturing so in exploring conditions, which effect main board substrates and installed electronic components to bear mechanical strain and stress, which are often the main reasons of damages and malfunctions in the electronic packages. The research represented in the paper is aimed at identification and assessment of the strain and stress, which is produced and transmitted in the main board assemblies with respect to their installation technology. The identification of mechanical interaction between parts of printed circuit boards is based on representing them as mechanical system "main board – electronic component", in which producing and transmitting strain depends on rigidity of their parts, in particular leads of the electronic components. The consideration was made to reduce rigidity of leads in order to reduce strain transmission from main board to installed electronic components due to changes in installation technologies that implied forming mounting leads so as to increase their length. The research objectives were chosen to be metal-ceramic resistors OMLT-0.125 installed on the main board by using through-hole technology in three variants of installation: high; low; and standard. The experimental research of strain and stress in installed electronic components was performed by using method for mechanical static bending test and method for electro-tensometry. In order to provide identical strain and stress conditions during tests for all resistors mounted on the main board by mentioned technologies their tests were conducted by using test appliance designed to provide pure bending to tested boards. The assessment of the obtained research data indicated that the proposed installation technology by through-hole high installation of electronic components on the main boards allows reducing strain transmission from the main board to the installed electronic components against technologies of low and standard installation.

Keywords: printed circuit board, electronic component, solder joint, warpage, stress, strain.

Вступ

Одним із основних вузлів сучасної електронної апаратури є друкована плата, на яку встановлюють мікросхеми, дискретні компоненти, роз'єми, провідники та інші електронні компоненти. Такі плати часто називають об'єднувальними або функціональними.

Об'єднувальна плата складається із основи – пластини, виконаної із діелектрика (склотекстоліту, текстоліту, гетинаксу, ситалу тощо), на поверхні або/і всередині якої сформовано хоча б один шар з провідними доріжками. На основу плати монтується електронні компоненти, які з'єднуються своїми виводами із елементами провідного рисунку (контактними площадками). Основним методом отримання електричних з'єднань, а також кріплення компонентів в вузлах і блоках електронних систем, залишається на сьогоднішній день пайка або, значно рідше, зварювання.

Паяні з'єднання є широким класом нероз'ємних з'єднань, утворення яких здійснюється в результаті взаємодії матеріалів деталей із матеріалом припою [1, 2, 3]. Кристалізація, тобто затвердіння припою утворює електричний контакт та жорсткий механічний зв'язок між об'єднувальною платою та електронними компонентами забезпечуючи підтримку останніх на платі. Завдяки механічному зв'язку, який представляє собою жорстке і нерухоме защемлення двох або більше виводів електронних компонентів, виникає взаємодія об'єднувальної плати з тілами електронних компонентів через вузли паяних з'єднань, які виступають тепер механічними в'язями. Защемлення виводів ЕК створює передумови для виникнення та передачі деформацій і напружень у всіх ланках механічного зв'язку, тобто в об'єднувальної платі, електронних компонентах, контактних вузлах та виводах.

Такі деформації і напруження виникають в результаті дії як експлуатаційних факторів, так і технології монтажу і слід зазначити, що саме вони не рідко виявляються причиною руйнування електричних ланцюгів та втрати працездатності електронних вузлів та модулів.

Метою представлено дослідження є виявлення та оцінка впливу технології та способів монтажу електронних компонентів на виникнення та передачу напружень і деформацій в конструкціях об'єднувальної плати.

Характер механічної взаємодії в системі «об'єднувальна плата – електронний компонент»

Наскрізний монтаж електронних компонентів з двома осьовими виводами (наприклад, резисторів, конденсаторів та діодів) здійснюється шляхом згинання виводів під кутом 90 градусів в одному напрямку, та установки в металізовані отвори друкованої плати, паяння виводів і обрізання кінців; часто виводи, що знаходяться на зворотній стороні плати, згинають в протилежних напрямках з метою підвищення їх механічної міцності. У технології поверхневого монтажу компонент розміщується на друкованій платі таким чином, щоб виводи розташовувались на поверхні контактних площадок і потім припаювались.

Аналіз експлуатації виробів електроніки показує, що за існуючої технології формування виводів мали місце їх численні поломки, що спричинило порушення функціональної працездатності електронних вузлів та блоків [2–6].

Всі елементи механічної системи, яка представляє собою нероз'ємне паяне з'єднання між об'єднувальною платою та дискретним компонентом, відчувають в тій чи іншій мірі пружні деформації. Перш за все, це лінійні деформації та деформації згину. Наявність в такому ланцюзі пружних робочих органів, зокрема виводів, що зв'язують об'єднувальну плату та електронний компонент, однозначно визначає необхідність врахування пружних властивостей цих елементів, таких як модуль пружності та коефіцієнт лінійної жорсткості.

У відповідності до закону Гука механічне напруження при розтягу визначається так [7]:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (1)$$

де ε – відносна деформація (видовження) тіла; E – модуль Юнга матеріалу тіла.

Відносна деформація тіла визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2)$$

де Δl – деформація тіла; l – початкова довжина тіла.

Механічне напруження σ також представляє собою інтенсивність розподілення внутрішньої сили опору матеріалу на площі його поперечного перерізу:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (3)$$

де F – внутрішня сила опору матеріалу; S – площа поперечного перерізу тіла.

Для врахування впливу конструктивних особливостей виводів електронних компонентів на вид залежності між силовим параметром і деформацією закон Гука записується у виді:

$$F = C \cdot \Delta l, \quad (4)$$

де C – коефіцієнт жорсткості тіла.

Враховуючи формули (1–4) вираз для коефіцієнту жорсткості прийме вид:

$$C = \frac{E \cdot S}{l} \quad (5)$$

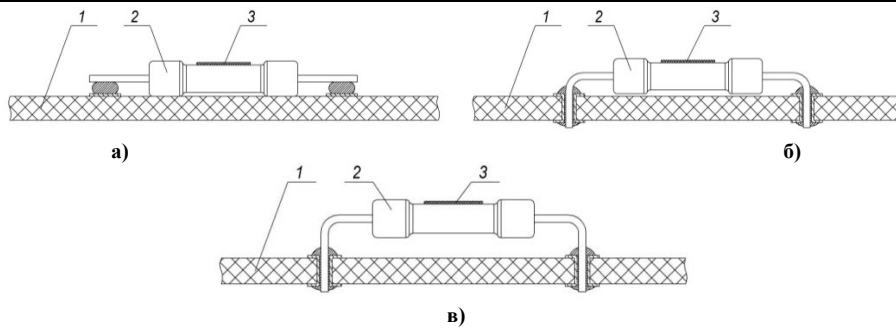
Таким чином C , від якого залежить створення та передача деформації в механічній системі «об'єднувальна плата – електронний компонент», в свою чергу, залежить від таких параметрів виводів електронного компонента, як модуль Юнга E , площа поперечного перерізу S та довжина l .

Було запропоновано зменшити жорсткість виводів, що дозволяло б зменшити передачу деформації від об'єднувальної плати до електронного компоненту, шляхом внесення зміни в технологію монтажу за рахунок формування монтажних виводів із збільшенням їх довжини.

Випробування об'єднувальної плати під дією зовнішнього механічного навантаження на згин

В якості об'єктів дослідження були вибрані металокерамічні резистори ОМЛТ-0,125. Для вимірювання монтажних деформацій резистори препарувались тензодатчиками МПБ-1. Далі здійснювався монтаж резисторів за заводською технологією на об'єднувальну плату розміром 350×75 мм. Випробування плат проводилось під дією зовнішнього механічного навантаження на згин [4, 5]. Експеримент було проведено для партії резисторів за трьома способами формування їх виводів (рис. 1). Крім випробувань резисторів встановлених за двома існуючими способами: без формування виводів (рис. 1, а) та з низьким формуванням виводів (рис. 1, б), з метою вдосконалення існуючої технології монтажу було запропоновано спосіб з високим формування виводів резисторів показаний на рис. 1, в.

З метою забезпечення ідентичності напружено-деформованого стану резисторів, змонтованих на об'єднувальній платі за вказаними технологіями формування виводів, випробування проводились навантаженням плати за схемою чистого згину на установці, показаний на рис. 2.



1 – об'єднувальна плата; 2 – резистор; 3 – тензодатчик
 Рис. 1. Способи установки резисторів на об'єднувальній платі:
 а) без формування виводів; б) з низьким формуванням виводів; в) з високим формуванням виводів

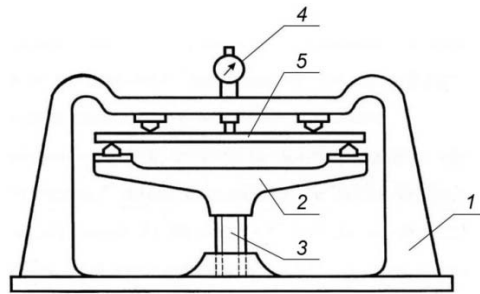


Рис. 2. Установка для випробування об'єднувальних плат на чистий згин:
 1 – основа; 2 – рухома балка; 3 – гвинт підйому; 4 – індикатор; 5 – об'єднувальна плата

Розрахункова схема чистого згину представлена схемою навантаження та епюрою згинальних моментів на рис. 3, де P – сила з якою відбувається навантаження під час випробування, f – прогин основи друкованої плати під дією навантаження, l – відстань між опорами, яка представляє собою довжину ділянки чистого згину, M – згинальний момент що діє в поперечному перерізі друкованої плати.

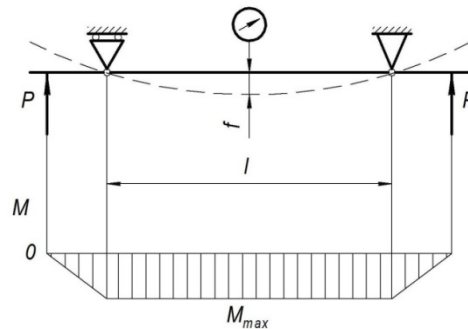


Рис. 3. Розрахункова схема установки для випробування об'єднувальних плат на чистий згин

Попередньо були проведені контрольні випробування умов чистого згину об'єднувальних плат при різних рівнях навантаження. Досліджувані плати препарували тензодатчиками базою 10 мм як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках. Було встановлено, що розкид показань тензодатчиків як в поперечному, так і в поздовжньому напрямках не перевищує 5%. При цьому, деформації в поперечному напрямку – практично були відсутні.

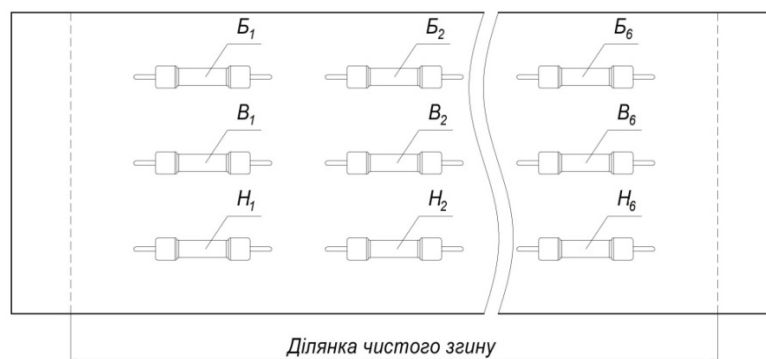


Рис. 4. Розташування резисторів на об'єднувальній платі:
 без формування (Бj); з низьким (Hj); високим (Bj) формуванням виводів

Далі, для проведення експериментального дослідження передачі деформацій від об'єднувальної плати до резисторів останні монтувалися в три ряди на ділянці об'єднувальної плати, яка піддається деформації чистого згину (рис. 4). У кожному з рядів були резистори з однаковим способом формування виводів. При цьому монтаж резисторів проводився паралельно поздовжньої осі об'єднувальної плати і при згині останньої деформації резисторів та вузлів їх з'єднання були однаковими.

Визначення деформацій і напружень дискретних компонентів методом електротензометрії та впливу на них технології формування монтажних виводів

Відносна деформація зовнішніх волокон об'єднувальної плати визначається через її максимальний прогин f , який вимірюється індикатором, залежністю [7, 8, 9]:

$$\varepsilon = \frac{4h}{l^2} f, \quad (6)$$

де h – товщина плати; f – прогин; l – довжина ділянки чистого згину.

Величину прогину f в установці можна змінювати в межах 0–10 мм. При цьому, зусилля не перевищує 50 Н. Варіюючи прогин об'єднувальної плати, реєстрували показники тензодатчиків [3, 6], наклеєних на резистори. Так як всі резистори перебували в однакових умовах, то відмінності в рівнях деформацій резисторів залежали тільки від типу формування їх виводів.

Результати тензометрування резисторів при максимальному прогині об'єднувальної плати, рівному 8 мм представлені графіками на рис. 5.

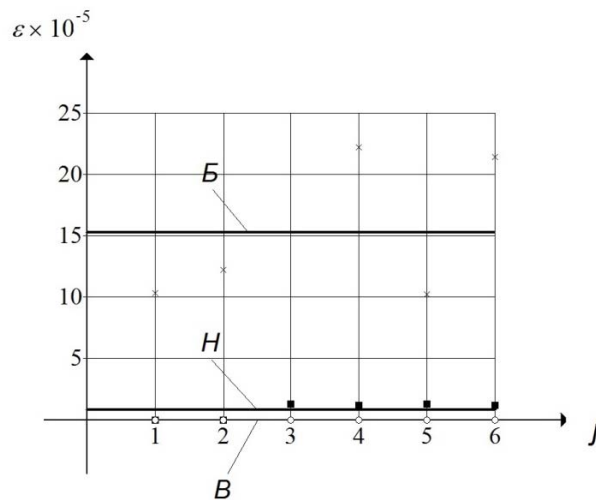


Рис. 5. Розподіл відносних деформацій розтягу резисторів (маркери) і їх середні значення (суцільні лінії) при максимальному прогині об'єднувальної плати, рівному 8 мм; маркери: × – без формування (Б); ■ – низького (Н); о – високого (В) формування виводів

Найбільш чутливими до деформацій об'єднувальної плати виявились резистори B_j , встановлені на плату без попереднього формування виводів, а найменш – резистори B_j з високим формуванням виводів. Це пояснюється тим, що при установці резистора на плату без формування виводів (рис. 1, а) їх ковпачки лежать на поверхні плати, а самі виводи посилені шаром припою. В цілому, така компоновка відповідає схемі навантаження резистора із заземленими кінцями (жорстка установка). При такій установці зусилля на резистор передаються не тільки через виводи, а й безпосередньо через ковпачки.

При високому формуванні виводів (рис. 1, в) гарантовано забезпечується зазор між ковпачками резисторів і платою, внаслідок чого ймовірність того, що вивід в цілому буде залитий припоєм, є низькою. Тому в цьому випадку при згині плат деформуються тільки виводи, а на резистор навантаження практично не передається (податлива установка).

Низьке формування виводів (рис. 1, б) з точки зору навантаження, слід розглядати як проміжне між двома описаними вище. У цьому випадку передача навантаження на резистор залежить від ступеня заливки виводів припоєм. Коли більша частина виводів залишається вільною від припою і ковпачки не торкаються монтажної плати (резистори H_1 і H_2), навантаження на резистор не передається, що наочно видно з рис. 5. Коли ж весь вивід залитий припоєм і між ковпачками і платою майже немає зазору (резистори H_3 – H_6), схема навантаження наближається до випадку жорсткої установки і відповідно зростають деформації і напруження.

Важливо зазначити, що за результатами обрахунку напружень, за формулою (1), який було проведено для модуля пружності матеріалу резисторів $E = 1 \times 10^5$ МПа, було встановлено, що напруження, які передаються при деформації об'єднувальної плати на резистори без формування виводів ($\sigma = 9,8...17,4$ МПа) складають приблизно 20 % від напружень руйнування ($\sigma_{руйну} = 95...165$ МПа).

Висновки

Для визначення характеру механічної взаємодії між елементами друкованих вузлів, їх конструкція представлена механічною системою «об'єднувальна плата – електронний компонент», в якій створення та передача деформації залежать від жорсткості її елементів, зокрема виводів електронних компонентів.

Запропоновано установку для випробування об'єднувальних плат навантаженням за схемою чистого згину, яка забезпечує ідентичність напружено-деформованого стану електронних компонентів, змонтованих на об'єднувальній платі.

Запропоновано спосіб високого наскрізного монтажу електронних компонентів на об'єднувальній платі, який дозволяє зменшити передачу деформацій від об'єднувальної плати до електронних компонентів, порівняно із технологією низького наскрізного та поверхневого монтажу.

Література

1. ДСТУ 2646-94. Плати друковані. Терміни та визначення.
2. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – 2016. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 489–494. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.
3. C. T. Robertson, “Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics”, Prentice Hall, 2003.
4. Boiko J. Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017 IEEE First Ukraine Conference on. – IEEE, 2017. – P. 514–517. – DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100294.
5. D. Vogel, V. Grosser, A. Schubert, B. Michel “MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures”, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 36, Issue 2, 2001.
6. Kovtun I. Theory and practice of vibration analysis in electronic packages / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński // *MATEC Web Conf. 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles*. – 2018. – Vol. 182. – P. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202015>.
7. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Є.С. Уманський – К. : Вища школа, 1993. – 655 с.
8. R.M. Jones, “Buckling of Bars, Plates and Shells”, Virginia, USA: Blacksburg, Bull Ridge Publishing, 2006.
9. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

References

1. DSTU 2646-94. Printed circuit boards. Terms and definitions.
2. Kovtun I. Effects of the strain transmission from the main board to the installed electronic components / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, G. Baurienė, K. Pilkauskas // *Mechanika*. – 2016. – Vol. 22, Iss. 6. – P. 489–494. – DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.22.6.16891>.
3. C. T. Robertson, “Printed Circuit Board Designer's Reference: Basics”, Prentice Hall, 2003.
4. Boiko J. Vibration transmission in electronic packages having structurally complex design / J. Boiko, I. Kovtun, S. Petrashchuk // *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017 IEEE First Ukraine Conference on. – IEEE, 2017. – P. 514–517. – DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100294.
5. D. Vogel, V. Grosser, A. Schubert, B. Michel “MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures”, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 36, Issue 2, 2001.
6. Kovtun I. Theory and practice of vibration analysis in electronic packages / I. Kovtun, J. Boiko, S. Petrashchuk, T. Kałaczyński // *MATEC Web Conf. 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles*. – 2018. – Vol. 182. – P. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202015>.
7. Pisarenko G.S. Strength of materials / G.S. Pisarenko, O.L. Kvitka, E.S. Umanski – K. : High school, 1993. – 655 p.
8. R.M. Jones, “Buckling of Bars, Plates and Shells”, Virginia, USA: Blacksburg, Bull Ridge Publishing, 2006.
9. Levshina E.S. Elektricheskie ismereniya phisicheskikh velichin / E.S. Levshina, P.V. Novitsky – L. : Energoatomizdat, 1983. – 320 p.

Рецензія/Peer review : 19.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Стаття прорецензована редакційною колегією

АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В работе показано, что из-за противоположности направления векторов чувствительности и направления измеряемой инерционной силы известные акселерометры позволяют измерить только линейные инерции и ускорения, изменяющиеся в относительно малых пределах, но не позволяют измерить скорости движущихся объектов. С другой стороны из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, их конструкции в определенной мере усложняются. Для достижения поставленной цели разработан акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов, в котором наличие пьезоэлектрического элемента с секцией возбуждения механических колебаний и с секцией чувствительного элемента, вырабатывающего сигналы при быстроизменяющемся ускорении и скорости движущегося объекта измерений в автоматическом режиме позволяет повысить амплитуды сигнала и чувствительность в 4-5 раз за счет снятия сигнала с чувствительных элементов в вибрационном режиме акселерометра, создаваемого возбуждения. Кроме того, поставленная цель достигается за счет совпадения направления оси чувствительности пьезоэлектрического биморфного элемента с направлением инерционной силы измеряемого линейного движения.

Ключевые слова: акселерометр, вибрация, ускорение, скорость, пьезоэлемент, движущийся объект, виброметрия, виброконтроль, виброскорость, виброперемещение, масштабный коэффициент.

T.M. MANSUROV, CH.P. ALIYEV
Azerbaijan Technical University, Baku

THE ACCELEROMETER FOR MEASUREMENT OF ACCELERATIONS AND SPEEDS OF MOVING OBJECTS IN THE AUTOMATIC MODE

In work it is shown that because of contrast of the direction of vectors of sensitivity and the direction of the measured inertial force the known accelerometers allow to measure only linear inertia and the accelerations changing in rather small limits, but doesn't allow to measure speeds of moving objects. On the other hand because of existence of the elements creating electromagnetic fields, their design in a certain measure becomes complicated. For achievement of a goal the accelerometer is developed for measurement of accelerations and speeds of moving objects in the automatic mode. In the offered accelerometer supply with the sensor of provision of a subject to measurements by means of the block of recognition of signals of three axes of "XYZ" of rectangular system of coordinates provides definition of an axis X, Y or Z with measurement of acceleration or linear speed when moving a subject to measurements. Connection of the second exits of differential operational amplifiers via shapers of the impulses and integrators connected to entrances of the second digital indicators is provided measurement of speed of movement of a subject to measurements concerning three axes of "XYZ" of rectangular system of coordinates. Due to damping of piezoelectric elements with help "П" - figurative flat springs on all three axes of "XYZ" of rectangular system of coordinates at the movement of a subject to measurements on one of coordinate axes, on two other axes the developed signals of hindrances on amplitude considerably decrease by their repayment since the directions of the mechanical oscillations creating amplitudes of hindrances settle down along axes of rectangular system of coordinates of piezoelectric elements. Existence in a design of a piezoelectric element of section of initiation of mechanical oscillations and also sections of the sensitive element developing signals at the fast-changing acceleration and speed of a moving object, amplitude of a signal and sensitivity increases by 4-5 times at the movement of a subject to measurements of acceleration and speed in the automatic mode due to development of a signal sensitive elements in the vibration mode of the excitement created in the accelerometer.

Keywords: accelerometer, vibration, acceleration, speed, piezoelement, moving object, vibrometry, vibration control, vibrospeed, vibromovement, large-scale coefficient.

Введение. Актуальность исследований колебательных процессов связана с разработкой, испытанием и эксплуатацией различных технических и технологических устройств и эти исследования проводится с помощью виброметрии. Но наряду с этим, в последние годы широкое применение получили информационно-измерительной системы виброконтроля, мониторинга, диагностики и автоматического управления сложными техническими системами и технологическими процессами, дающими не только большой технико-экономический эффект, но и способствующие предотвращению возникновения редких событий.

Первичным звеном таких систем являются датчики параметров вибрационных и ударных колебаний, расположенные непосредственно на контролируемом объекте и осуществляющие преобразование измеряемой механической величины в электрический сигнал, поступающий на регистрирующее устройство. Из всех известных типов датчиков, наиболее широкое применение находят пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи или акселерометры, которые относятся к датчикам генераторного типа и непосредственно преобразуют вибрационное или ударное ускорение в пропорциональный электрический сигнал.

Акселерометр представляет собой закрепленную в упругом подвесе чувствительную массу и отклонение массы от ее первоначального положения при наличии кажущегося ускорения несет информацию о величине этого ускорения. Акселерометры считаются устройствами с одной степенью свободы и в его состав входят специальный элемент, называемый инерционной массой, движение которого отстает от движения корпуса, упругая поддерживающая система (пружина) и демпфирующее устройство. Независимо от конструкции датчика ускорений его основная цель заключается в детектировании перемещения этой

массы относительно корпуса устройства и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Поэтому другой составной частью всех акселерометров является детектор перемещений, способный измерять микроскопические амплитуды вибрационных колебаний или линейных ускорений. Выходной сигнал акселерометра, пропорциональный значению ускорения механических колебаний, может быть преобразован в электрический сигнал, пропорциональный виброскорости или виброперемещению [1–6].

Объектом исследований является акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов в автоматическом режиме.

Предметом исследований является исследование основных принципов и закономерностей повышения чувствительности и расширения функциональной возможности акселерометра.

Целью работы является повышение чувствительности и достоверности и расширение функциональных возможностей пьезоэлектрического акселерометра измерения ускорения и скорости при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат в автоматическом режиме. Поставленная цель достигается за счет совпадения направления оси чувствительности пьезоэлектрического биморфного элемента с направлением инерционной силы измеряемого линейного движения.

Постановка задачи. Для измерения линейных ускорений и скоростей движущихся объектов обычно применяются пьезоэлектрические акселерометры, что и связано с их преимуществом, т.е. широким рабочим диапазоном частот, линейностью амплитудной характеристики в широком динамическом диапазоне, высокой стойкостью к внешним воздействиям, активным характером преобразования, не требующим применения источника питания, отсутствием движущихся частей, гарантирующие высокую надежность и долговечность, возможностью реализации малогабаритного исполнения и технологичностью в производстве.

В известных акселерометрах из-за противоположности направления векторов чувствительности и направления измеряемой инерционной силы они позволяют измерить только линейные инерции и ускорений, изменяющихся относительно малых пределах, но не позволяют измерить скорости движущегося объекта измерений. С другой стороны из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, их конструкции в определенной мере усложняется. В связи с этим возникает необходимость разработки пьезоэлектрического акселерометра, в котором вектор поляризации пьезоэлемента направлен вдоль оси чувствительности акселерометра, т.е. с направлением вектора линейного ускорения движущегося объекта измерений.

Разработка акселерометра. В настоящее время известны вибрационные устройства измерения ускорений для измерения линейных ускорений и скоростей и определения внешних влияний при отклонении из позиций движущихся объектов. Но в таких устройствах из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, их конструкция в определенной мере усложняется [7–12].

Известен «Пьезоэлектрический акселерометр» для измерения ускорения и скорости объекта измерений [7], который содержит пьезоэлектрические чувствительные элементы, расположенные вдоль осей «XYZ» прямоугольной системы координат и инерционные массы, механически связанные с пьезоэлектрическими чувствительными элементами. В известном акселерометре осуществление автоматического режима измерений ускорения при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по координатным осям «XYZ» прямоугольной системы, отслеживание направления, ввиду наличия поперечных колебаний, не совпадающих с осью чувствительности представляет определенные трудности. Кроме того, для измерения скорости движения объекта измерений отсутствует возможность интегрирования сигнала ускорения, что в определенной мере ограничивает функциональные возможности акселерометра.

При движении объекта измерений вдоль одной из осей прямоугольной системы координат, из-за того, что чувствительные элементы, выполненные в виде пустотелых цилиндров, соединенных между собой жестко на основании, по причине отсутствия демфера, гасящего поперечные механические колебания по этим осям, они создают сигналы помех напряжения, которые значительно затрудняют выделение полезного сигнала и получение необходимой достоверности измерения ускорения и скорости по данной оси объекта измерений.

Предложенный трехкоординатный акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов измерения в автоматическом режиме (рис. 1) [13] содержит пьезоэлектрические элементы, выполненные в виде двухслойных плоских пластин, склеенных или сваренных между собой широкими гранями, имеющими секцию возбуждения -1,2,3 и секцию чувствительного элемента -4,5,6, изолированных друг от друга изоляционными канавками -7,8,9, причем пьезоэлектрические элементы демпфированы относительно продольных координатных осей через «П»-образные плоские пружины -10,11,12, при этом объект измерения -13 снабжен трехкоординатным датчиком положения -14, электроды -15 которого подключены к первому входу первого дифференциального операционного усилителя -16, ко второму входу которого соединен выход блока выборки -17 осей прямоугольной системы координат «XYZ», первый 18, второй -19, третий -20 выходы первого дифференциального операционного усилителя по трем осям координат соединены к входам порогового устройства -21, блока распознавания -2 сигналов координат (рис. 4) с возможностью поцикловой обработки случайной последовательности, выходы порогового устройства соединены к входам блока памяти -23, который подключен к задатчику кода управления -24 и

к управляющему блоку -25, выходы которого по трем осям «XYZ» подключены к управляющим входам триггеров -26,27,28, выходы которых соединены к входам электронных ключей -29,30,31, сигнальные входы и выходы которых соответственно соединены к входам источника переменного напряжения -32,33,34 координатных осей «XYZ» и к электродам возбуждения пьезоэлектрических элементов, а электроды чувствительных элементов координатных осей «XYZ» подключены к входам дифференциальных операционных усилителей -35,36,37 координатных осей «XYZ», первые выходы которых через формирователи импульсов -38,39,40 подключены к первым цифровым индикаторам -41,42,43, а вторые выходы дифференциальных операционных усилителей через формирователи импульсов -44,45,46 и интеграторы -47,48,49 соединены к входам вторых цифровых индикаторов -50,51,52. Инерционные массы -53,54,55 механически связаны с пьезоэлектрическими чувствительными элементами. Пьезоэлектрические элементы установлены на «П» - образных плоских пружинах. Все элементы акселерометра расположены в предохранительных кожухах -56,57,58.

На рис. 1 представлена схема предложенного «Трехкоординатного акселерометра для измерения ускорения и скорости объекта измерений в автоматическом режиме» с устройством управления, на рис. 2, 3 - схема операционных дифференциальных усилителей с подключенными секциями возбуждения и секциями чувствительных элементов, а на рис. 4 приведена схема распознавания сигналов координат по их амплитуде и частоте [13].

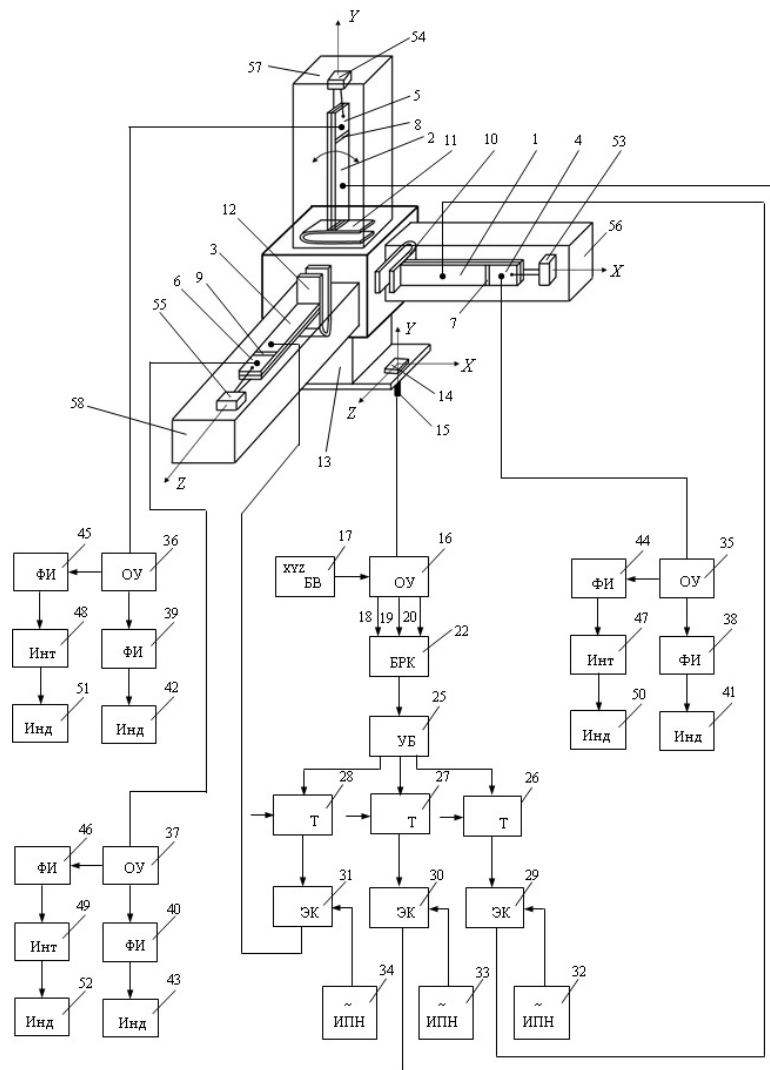


Рис. 1. Схема акселерометра с устройством управления

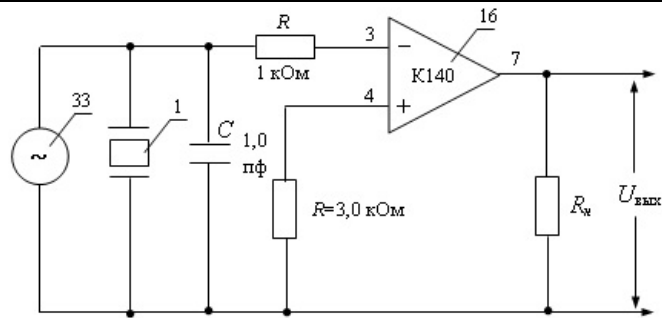


Рис. 2.

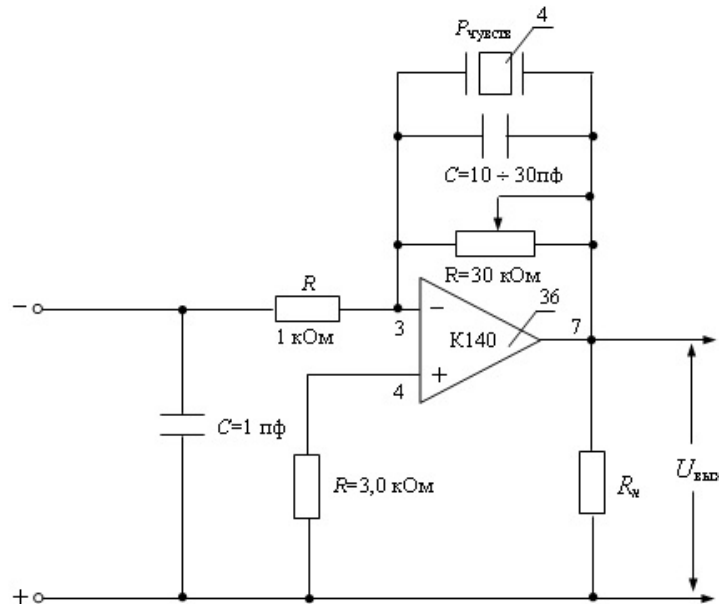


Рис. 3. Схема операционных дифференциальных усилителей с секциями возбуждения и чувствительных элементов

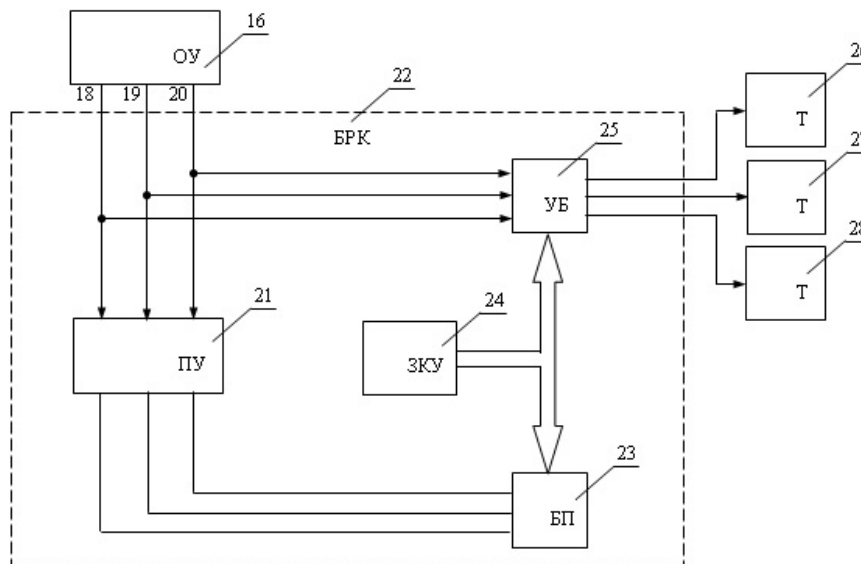


Рис. 4. Схема распознавания сигналов координат по их амплитуде и частоте

Принцип работы акселерометра

В начале в зависимости от требуемого направления движения объекта измерений -13 в блоке выборки -17 устанавливается первоначальное положение на одной из осей «XYZ» прямоугольной системы координат. При движении объекта измерений -13 в направлении вдоль оси «X» сперва трехкоординатный датчик положения -14 воспринимает движение объекта измерений -13 и сигналы с его выхода поступают на вход дифференциального операционного усилителя -16. Усиленные сигналы, проходя через пороговое устройство -21 (рис. 4), поступают в блок распознавания координат -22 (рис. 1, 4), которые подаются в блок памяти -23. Сигналы с выхода задатчика кода управления -24 (рис. 4) поступают на вход блока памяти -23 и управляемый блок -25, с выхода которого сигналы распознают по их амплитуде, по их частоте или по их среднему значению в выделенной полосе частот. Поскольку максимальная амплитуда сигнала имеет место

по оси «Y», т.к. направление оси чувствительности в трехкоординатном датчике -14 по оси «Y» прямоугольной системы координат совпадает с направлением движения объекта измерений -13 вдоль оси «X», сигналы с выхода блока распознавания координат -22 оси «Y» подаются на управляющий вход триггера -27, с выхода которого сигналы поступают на управляющий вход электронного ключа -30. При этом сигналы с выхода источника переменного напряжения -33 подаются на сигнальный вход электронного ключа -30, с сигнального выхода которого напряжение поступает на электроды секции возбуждения -2 пьезоэлектрического элемента, создающие в нем знакопеременные изгибные колебания (рис. 1), направление которых совпадает с направлением вектора оси чувствительности секции - чувствительного элемента -5 (рис. 1) [13].

При линейном движении объекта измерений -13 в зависимости от изменения скорости в направлении вдоль оси «X» инерционная масса -54, ввиду своей инерционности отстает или опережает корпус объекта измерений -13, что создает воздействие инерционных сил на чувствительный элемент -5 (рис. 1), приводя его к изгибным деформациям, вырабатывающим сигналы, пропорционально изменяющемуся ускорению. Указанные сигналы поступают на дифференциальный усилитель -36 (рис. 3).

Усиливаясь, эти сигналы через формирователь импульсов -39 подаются на цифровой индикатор -42, показывая измеряемое ускорение прямолинейного движения объекта измерений -13, а сигналы, проходящие через формирователь импульсов -45, интегратор -48 и цифровой индикатор -51 показывают измеряемую скорость движения объекта измерений -13.

Измерение ускорения и скорости прямолинейного движения объекта измерений -13 относительно двух других осей «Y» и «Z» прямоугольной системы координат осуществляется в автоматическом режиме работы аналогично в вышеописанной последовательности. С помощью трехкоординатного датчика положения -14, операционного усилителя -16 и блока распознавания координат -22 осуществляется автоматическое переключение координатных осей «XYZ» в зависимости от изменения направления движения объекта измерений -13. Инерционные массы -53,54,55 механически связаны с пьезоэлектрическими чувствительными элементами. Все элементы акселерометра расположены в предохранительных кожухах -56,57,58.

Выводы

Таким образом, разработанный акселерометр отличается следующими важными новыми особенностями.

В известном акселерометре осуществление автоматического режима измерений ускорения и скорости при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат, отсутствие датчика положения объекта измерений и схемы управления в его конструкции не предусмотрены, что ограничивает функциональные возможности акселерометра. В предложенном акселерометре снабжение датчиком положения объекта измерений с помощью блока распознавания сигналов трех осей «XYZ» прямоугольной системы координат обеспечивает определение оси X, Y или Z с измерением ускорения или линейной скорости при перемещении объекта измерений.

Измерение скорости перемещения объекта измерений в известном акселерометре из-за отсутствия интегратора для интегрирования ускорения измерение скорости перемещения не обеспечивается. В предложенном акселерометре соединение вторых выходов дифференциальных операционных усилителей через формирователи импульсов и интеграторы, соединенных к входам вторых цифровых индикаторов обеспечивается измерение скорости перемещения объекта измерений относительно трех осей «XYZ» прямоугольной системы координат.

В известном акселерометре при движении объекта измерений в направлении вдоль одной из осей «XYZ» прямоугольной системы координат по другим осям из-за жесткого крепления пьезоэлектрических чувствительных элементов через их основания, они создают сигналы помех, амплитуда которых превышает амплитуду полезного сигнала, что не обеспечивает достоверность измеряемого ускорения или скорости объекта измерений. В предложенном акселерометре за счет демпфирования пьезоэлектрических элементов с помощью «П» - образных плоских пружин по всем трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат при движении объекта измерений по одной из координатных осей, по двум другим осям вырабатываемые сигналы помех по амплитуде значительно уменьшаются путем их погашения, т.к. направления механических колебаний, создающих амплитуды помех располагаются вдоль осей прямоугольной системы координат пьезоэлектрических элементов.

Чувствительность в известном акселерометре сравнительно невысокая, т.к. состоит из чувствительных пьезоэлектрических элементов, обладающих большей жесткостью и требующих действия сравнительно больших механических усилий для выработки сигналов при движении объекта измерений ускорения и скорости в автоматическом режиме. В предложенном акселерометре наличие в конструкции пьезоэлектрического элемента секции возбуждения механических колебаний, а также секции чувствительного элемента, вырабатывающего сигналы при быстроизменяющемся ускорении и скорости движущегося объекта, амплитуда сигнала и чувствительность повышается в 4-5 раз при движении объекта измерений ускорения и скорости в автоматическом режиме за счет выработки сигнала чувствительными элементами в вибрационном режиме возбуждения, создаваемого в акселерометре.

Литература

1. Иориш Ю.И. Виброметрия. Издание второе, переработанное и дополненное / Иориш Ю.И. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 771 с.
2. Генкин М.Д. Вибрации в технике : справочник : в 6-и т. Т. 5. Измерения и испытания / Генкин М.Д., Соколова А.Г. ; ред. совет: В.Н. Челомей. – М. : Машиностроение, 1981. – 496 с.
3. Фридлиндер Г.О. Пилотажные манометрические приборы, компасы и автоштурманы / Фридлиндер Г.О., Селезнев В.П. – М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1953. – 368 с.
4. Клюев В.В. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара : справочник : в 2 кн. Книга 1 / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1978. – 448 с.
5. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / Виглеб Г. ; пер. с немецкого. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
6. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. ; под ред. В.М. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Патент РФ №2400760. Пьезоэлектрический акселерометр / Кирпичев А.А. – М., 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.findpatent.ru/patent/2400760.html>.
8. Брюль Пьезоэлектрические акселерометры и преусилители. Справочник по теории и эксплуатации / Брюль и Кьер. – Нэрум : Дания, издание фирмы Брюль и Кьер, 1978. – 111 с.
9. Янчич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры) / Янчич В.В. – Ростов-на-Дону : Известия Южного федерального университета, 2010. – 304 с.
10. Пельх А.Н. Некоторые особенности пьезокерамики акселерометров при больших однократных ударах / А.Н. Пельх, П.Г. Соколов // Электроника. Приборостроение. БТИ. – 1977. – № 4. – С. 8–15.
11. Семенов Н.А. Потери при вводе энергии в оптический кабель / Н.А. Семенов // Электросвязь : ежемесячный научно-технический журнал по проводной и радиосвязи, телевидению и радиовещанию. – М., 1980. – № 12. – С. 24–26.
12. АС СССР №1021309. Пьезоэлектрический шаговый двигатель / Юсифзаде Э.М. и др. – М., 1981.
13. Трехкоординатный акселерометр для измерения ускорения и скорости объекта измерений в автоматическом режиме / Мансуров Т.М., Алиев Ч.П. / Евразийская патентная организация (ЕАПО), Москва. – Заявка № 201700327/26 от 04.07.2017.

References

1. Iorish YU.I. Vibrometriya. Izdanie vtoroe, pererabotannoe i dopolnennoe / Iorish YU.I. – M. : Gosudar-stvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo mashinostroitel'noy literatury, 1963. – 771 s.
2. Genkin M.D. Vibratsii v tehnikе : spravochnik : v 6-i t. T. 5. Izmereniya i ispytaniya / Genkin M.D., Soko-lova A.G. ; red. совет: V.N. Chelomey. – M. : Mashinostroenie, 1981. – 496 s.
3. Fridlender G.O. Pilotajnyie manometricheskie pribory, kompasy i avtoshturmany / Fridlender G.O., Seleznev V.P. – M. : Gosudarstvennoe izdatelstvo obronnoy promyshlennosti, 1953. – 368 s.
4. Klyuev V.V. Pribory i sistemy dlya izmereniya vibratsii, shuma i udara : spravochnik : v 2 kn. Kniga 1 / pod red. V. V. Klyueva. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 448 s.
5. Vigneb G. Datchiki. Ustroystvo i primeneniye / Vigneb G. ; per. s nemetskogo. – M. : Mir, 1989. – 196 s.
6. SHarapov V.M. Pezoelektricheskie datchiki / SHarapov V.M., Musienko M.P., SHarapova E.V. ; pod red. V.M. SHarapova. – M. : Tehnosfera, 2006. – 632 s.
7. Patent RF №2400760. Pezoelektricheskiy akcelerometr / Kirpichev A.A. – M., 2010 [Elektronnyiy re-surs]. – Rejim dostupu : <http://www.findpatent.ru/patent/2400760.html>.
8. Bryul Pezoelektricheskie akcelerometri i predusiliteli. Spravochnik po teorii i ekspluatatsii / Bryul i Kyer. – Nerum : Daniya, izdanie firmy Bryul i Kyer, 1978. – 111 s.
9. YAnchich V.V. Pezoelektricheskie vibroizmeritelnyie preobrazovateli (akcelerometri) / YAnchich V.V. – Rostov-na-Donu : Izvestiya YUjnogo federal'nogo universiteta, 2010. – 304 s.
10. Pelyih A.N. Nekotoryie osobennosti pezokeramiki akcelerometrov pri bolshih odnokratnyih udarah / A.N. Pelyih, P.G. Sokolov // Elektronika. Priborostroeniye. BTI. – 1977. – № 4. – S. 8–15.
11. Semenov N.A. Poteri pri vvode energii v opticheskiy kabel / N.A. Semenov // Elektrosvyaz : ejemesyachnyiy nauchno-tehnicheskiiy jurnal po provodnoy i radiosvyazi, televideniyu i radioveschaniyu. – M., 1980. – № 12. – S. 24–26.
12. AS SSSR №1021309. Pezoelektricheskiy shagovyyiy dvigatel / YUsifzade E.M. i dr. – M., 1981.
13. Trehkoordinatnyiy akcelerometr dlya izmereniya uskoreniya i skorosti obyekta izmereniy v avtomaticheskoy rezhime / Mansurov T.M., Aliev CH.P. / Evraziyskaya patentnaya organizatsiya (EAP0), Moskva. – Zayavka № 201700327/26 ot 04.07.2017.

Рецензія/Peer review : 19.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 18.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мусаев В.Г.

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ. МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ
СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО
ЧАСТЬ 3. ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ЗАКОНЫ, УСЛОВИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

В работе рассмотрена сущность явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество и условия его осуществления. Описаны фундаментальные законы магнетизма и электродинамики, положенные в основу явления переноса энергии и информации. Установлено шесть основных требований к материалам, используемым для передачи энергии и информации. Показано, что явление переноса энергии отрицательно заряженных квазичастиц сквозь материал описывается с использованием законов сохранения энергии электромагнитного поля и закона сохранения энергии движения по замкнутому контуру заряженных квазичастиц. Показано, что только с помощью закона сохранения механической энергии устанавливается связь между координатами и скоростями движения заряженных квазичастиц в двух симметрично расположенных точках траектории их движения по замкнутому контуру. Отмечено большое значение закона электромагнитной индукции Фарадея для решения задачи определения работы, совершаемой движущимися отрицательно заряженными квазичастицами с использованием двух разных явлений: генерации ЭДС под действием магнитной силы на движущиеся заряженные квазичастицы и генерации «трансформаторной» ЭДС под действием электрической силы вследствие изменения магнитного поля. Показано, что при описании явления переноса энергии и информации важная роль отводится второму закону Ньютона, связывающему силу, действующую на квазичастицу, с ее ускорением. Выделено три проявления явления переноса (и приема) энергии и информации. Сформулированы проблемы измерения энергии Ферми и Ландау и условия их решения. Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих магнитопольевые эффекты и явления, пути и методы создания сенсоров физических величин, а также изучающих магнитопольевые методы измерения свойств и состава веществ и материалов с использованием нового принципа измерений — явления переноса энергии и информации сквозь проводящие и слабо проводящие среды.

Ключевые слова: законы сохранения энергии, заряженные квазичастицы, явление передачи энергии и информации.

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 OR INFORMATION THROUGH MATERIAL OR SUBSTANCE
PART 3. THE CARRYING OVER PHENOMENON, USED FUNDAMENTAL LAWS, CONDITIONS AND
PROBLEMS OF MEASUREMENTS**

In paper the essence of the phenomenon of carrying over of energy and the information through substance and conditions of its realisation is considered. Fundamental laws of magnetism and electrodynamics, the phenomena of carrying over taken as a principle are described. Energy and the information. It is established six basic requirements to the materials used for a transmission of energy and the information through them. It is shown, that the phenomenon of a transmission of energy negatively charged quasiparticle through a material is described with use of laws of conservation of energy of an electromagnetic field and the law of conservation of energy of movement on the closed contour n charged quasiparticle. It is shown, that only by means of the law of preservation of mechanical energy connection between co-ordinates and speeds of movement charged quasiparticle in two different points of a trajectory of their movement on the closed contour is established. The great value of the law of electromagnetic induction Фарадея for the decision of a problem of definition of value of the work made moving negatively charged quasiparticle with use of two different phenomena is noted: generation ЭДС under the influence of magnetic force on moving charged quasiparticle and generation «transformer ЭДС under the influence of electric force owing to magnetic field change. It is shown, that at the description of the phenomenon of a transmission of energy and the information the important role is taken away Newton's connecting force to the second law, operating on quasiparticle, with its acceleration. It is allocated three displays of the phenomenon of carrying over (and reception) energy and the information, problems of measurement of energy of Fermi and Landau and conditions of its decision are formulated. Paper is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying magneto-fild effects and the phenomena, ways and methods creation of sensor controls of physical sizes, and also studying magneto-fild methods of measurement of properties and structure of substances and materials with use of a new principle of measurements — the phenomena of carrying over of energy and the information through spending and слабопроводящие environments.

Keywords: the laws of conservation of energy charged quasiparticle, the phenomenon of a transmission of energy and the information.

Введение

Работа направлена на создание и развитие новейшего научного направления в фундаментальной метрологии — магнитопольевой теории измерений (МП ТИ). В его основу положен новый физический принцип измерений — явление переноса энергии и информации отрицательно заряженных квазичастиц сквозь проводящие или слабо проводящие среды (материалы и вещества). Создание новейшего научного направления обусловлено острой необходимостью измерений и исследований энергии Ферми новых материалов микро- и макромира, энергий дискретных энергетических уровней Ландау при изучении электрических и частотных свойств наноматериалов, биоматериалов, радиоматериалов и т.д., и т.п., а также

необходимостью создания методов прямых и избыточных измерений свойств веществ и материалов на новом физическом принципе с целью решения существующих проблем фундаментальной метрологии и материаловедения.

В первой части работы были описаны философские аспекты магнитолевой теории измерений [1]. В других частях (см. статьи [2, 3]) рассмотрена классификация атрибутов магнитолевых эффектов — магнитных полей, веществ и материалов и видов информации, получаемой по результатам взаимодействия магнитного поля и вещества (материала). Обобщены и классифицированы эффекты и условия взаимодействия магнитного поля и материи. Приведена классификация основных классов магнитных веществ и материалов. Описана сущность наиболее интересных магнитолевых эффектов и явлений. Приведены соответствующие иллюстрации, установлены и указаны основные условия воспроизведения магнитолевых эффектов и явлений.

Настоящая работа посвящена созданию теоретических основ магнитолевой теории измерений (прямых и избыточных) на новом физическом принципе.

Объект исследований

Объектом исследований являются теоретические и практические аспекты взаимодействия магнитных полей высоких и сверхвысоких частот с отрицательно заряженными квазичастицами материала или вещества.

Предмет исследований

Предметом теоретических исследований является создание теоретических основ магнитолевой теории измерений, в основу которой положен новый физический принцип измерений — явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество при воздействии на них энергией импульсного магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты, а также установление существующих проблем, ограничений и условий.

Результаты исследований

1. Физические явления

Физическими называют явления, при которых не происходит превращение одних веществ в другие [4].

1.1. Явления движения заряженных квазичастиц

1.1.1. Токи проводимости, переноса и смещения

Магнитолевая теория измерений предполагает использование базовых понятий теории электромагнитного поля, отражающих ее сущность. В этой связи рассмотрим существующее понятие «электрический ток» и уточним определения понятий «ток проводимости», «ток переноса» и «ток смещения».

Полный электрический ток

Определение (классическое)

Электрический ток — явление движения заряженных частиц и явление изменения электрического поля во времени, сопровождаемые магнитным полем [5].

Данное определение нами уточнено:

«электрический ток — явление движения заряженных частиц и явление изменения электрического поля во времени, сопровождаемые порожденным ими магнитным полем».

Электрический ток — скалярная величина, равная сумме токов проводимости, переноса и смещения сквозь рассматриваемую поверхность.

Ток проводимости

Определение тока проводимости (классическое)

Электрическим током проводимости называется движение носителей электрических зарядов под действием электрического поля [6].

Это общепринятое определение. Оно используется преимущественно в тех случаях, когда электрическое поле создается путем подключения источника напряжения к разным точкам тела или концам проводника.

В приведенном определении не выделены вид носителей и значение напряженности электрического поля.

Предлагается следующее уточненное определение данному понятию:

«электрический ток проводимости — явление движения свободных носителей электрических зарядов под действием электрического поля определенной напряженности».

Электрический ток имеет количественные характеристики: скалярную — силу тока, и векторную — плотность тока.

Сила тока — физическая величина, равная отношению количества электричества ΔQ , прошедшего за некоторое время Δt через поперечное сечение проводника, к величине этого промежутка времени, т.е. $I = \Delta Q / \Delta t$.

Плотность тока проводимости является мерой тока, протекающего через единичную площадку, перпендикулярную вектору скорости движения носителей. Скорость носителей и плотность тока проводимости пропорциональны напряженности электрического поля.

Определение тока переноса (классическое)

Электрический ток переноса — электрический ток, осуществляемый переносом электрических зарядов телами, количественно характеризуемый скалярной величиной, равной производной по времени от

электрического заряда, переносимого телами сквозь рассматриваемую поверхность [7].

Приведенное определение чаще всего используется в химии и биологии.

Полагаем, что наиболее адекватно отражает сущность физических процессов при переносе энергии и информации через материал или вещество понятие «ток переноса».

Определение 1 (предложенное)

Электрический ток переноса — это явление движения заряженных (свободных, не связанных) квазичастиц в материальной условно непроводящей, слабо проводящей или проводящей среде.

В последнем случае этот ток называется электрическим током проводимости. Данное понятие широко используется в науке и технике, но справедливо строго для проводящих сред.

Отметим, что абсолютно непроводящих сред нет, поскольку в природе нет материалов и веществ, не содержащих электронов. Поэтому среду с минимально допустимым количеством электронов будем называть условно непроводящей.

Ток смещения

С учетом относительной диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon = 1 + \chi$, где χ — диэлектрическая восприимчивость среды, электрическое смещение определяется согласно уравнению величин

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 E = (1 + \chi) \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 E + \chi \varepsilon_0 E. \quad (1)$$

Дифференцируя (1) по времени, получим, что плотность тока смещения равна сумме плотности тока смещения в вакууме ($\varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$) и плотности тока поляризации ($\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}$), которая обусловлена перемещением зарядов в диэлектрике., т. е.

$$\mathbf{J}_{\text{см}} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{смв}} + \mathbf{J}_{\text{пол}}. \quad (2)$$

Напомним, что вектор поляризации диэлектрика $\mathbf{P}_l = \chi \varepsilon_0 \mathbf{E}$.

Согласно (2), всякое изменение электрического поля приводит к возникновению тока смещения. Ток смещения прямо пропорционален скорости изменения электрического поля [6].

Определения тока смещения (классическое)

Электрический ток смещения — величина, прямо пропорциональная скорости изменения электрической индукции (электрического смещения) [8].

Определение (предложенное)

Электрический ток смещения — явление смещения относительно своего исходного положения связанных заряженных квазичастиц в материальной, условно проводящей или слабо проводящей, среде.

Ток связанных зарядов — это перемещение средних положений связанных электронов и ядер, составляющих молекулу, относительно центра молекулы.

Сила тока смещения пропорциональна скорости изменения электрического смещения.

В диэлектриках электрическое смещения обусловлено как напряженностью E электростатического поля, так и поляризуемостью P диэлектрика.

Название «ток смещения» является условным, по сути это изменяющееся со временем электрическое поле. Ток смещения существует не только в вакууме или диэлектрике, но и внутри проводников, по которым проходит переменный ток. Однако в проводниках ток смещения пренебрежимо мал по сравнению с током проводимости [9].

1.2. Явление переноса¹ энергии и информации² сквозь материал (вещество)

Физическую сущность электромагнитной теории Максвелла применительно к проводящим и слабо проводящим материальным средам можно кратко сформулировать в виде четырех постулатов, аналогичных [10]:

1. В материале (веществе) источником электрического поля являются заряженные квазичастицы (электрические заряды);
2. В материале (веществе) силовые линии магнитного поля замкнуты либо начинаются и оканчиваются на бесконечности;
3. Изменяющийся магнитный поток порождает в материале (веществе) электрическое поле;
4. В материале (веществе) движущаяся заряженная квазичастица и изменяющийся электрический ток порождают магнитное поле.

Основные свойства электромагнитного поля описываются уравнениями Максвелла [11]:

1. Электрическое и магнитное поля тесным образом связаны между собой: изменение одного из них вызывает соответствующее изменение другого;
2. Источниками электромагнитного поля являются заряды и токи;
3. Магнитное поле всегда вихревое, электрическое поле может быть вихревым и потенциальным;
4. Силовые линии электрического поля могут иметь истоки и стоки, силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.

Установлено явление переноса энергии и информации сквозь материал¹ (вещество), заключающееся

¹ допускается использование термина «передача»

² входных данных

в воздействии на материал, из которого выполнена механическая система замкнутого типа, соленоидальным^{2*} импульсным магнитным полем высокой или сверхвысокой частоты, создании вихревого (индукционного) электрического поля, передачи энергии вихревого электрического поля в (кинетическую) энергию сложного волнового (поперечно-продольного) движения конечной совокупности отрицательно заряженных квазичастиц**, формировании токов переноса и смещения, создании этими токами соответствующего магнитного поля, порождении высокочастотной электромагнитной волны, передающей свою энергию вдоль замкнутого контура механической системы, наведении в неподвижном приемном контуре механической системы ЭДС электромагнитной индукции, трансформации ЭДС в переменное напряжение заданного уровня, выпрямлении, фильтрации или усреднении его, выделении на нагрузке сигнала электрической природы (тока или напряжения), удобного для восприятия данных (информации), запоминания, обработки и передачи потребителю.

Явление переноса энергии и информации сквозь материал (вещество) проявляется при условии выполнения следующей совокупности и последовательности физических операций:

- создание из материала с известными или неизвестными свойствами пассивной механической системы замкнутого типа;
- формирование и модуляция импульсного тока высокой или сверхвысокой частоты;
- создание соленоидального магнитного поля той же частоты;
- периодическое (с низкой стабильной частотой коммутации) воздействие энергией импульсного магнитного поля на механическую систему;
- формирование в материале механической системы вихревого (индукционного) электрического поля;
- передача энергии вихревого электрического поля в (кинетическую) энергию движения отрицательно заряженных квазичастиц материала механической системы;
- формирование токов переноса и смещения, текущих в замкнутом контуре механической системы;
- создание токами переноса и смещения соответствующего магнитного поля;
- порождение высокочастотной электромагнитной волны, переносящей энергию движения квазичастиц вдоль замкнутого контура механической системы;
- наведение (индуцирование) в неподвижном приемном колебательном контуре ЭДС электромагнитной индукции;
- трансформация ЭДС в переменное напряжение требуемого уровня (путем задания соответствующего значения коэффициента трансформации);
- выпрямление и усреднение полученного напряжения в течение полупериода низкой частоты коммутации;
- получение и оценка результата переноса энергии и входных данных (информации) через материал (вещество).

2. Фундаментальные законы, проявляющиеся в явлении переноса информации

2.1. Закон сохранения электромагнитной энергии

В основу явления переноса информации положено взаимодействие магнитного поля с заряженными квазичастицами материала (вещества), т.е. магнитолевой эффект. Формализовано это явление может быть описано в виде ряда математических выражений фундаментальных законов сохранения электромагнитной энергии и движения, уравнений Максвелла и др. В частности, например, описываемое явление зиждется на законе локального сохранения электромагнитной энергии, который в интегральной форме описывается аналитическим выражением вида [12]:

$$\oint_S \mathbf{\Pi} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_V \omega dV + \int_V p_{\Pi} dV = \int_V p_{\text{ст}} dV, \quad (3)$$

где $\mathbf{\Pi}$ — вектор Пойнтинга, характеризующий плотность потока электромагнитной энергии и указывающий направление ее движения; $\oint_S \mathbf{\Pi} \cdot d\mathbf{S}$ — мощность излучения (плотность потока

электромагнитной энергии, проходящего через элементарную поверхность dS исследуемого материала (вещества); $\frac{d}{dt} \int_V \omega dV$ — изменение во времени (приращение) объемной плотности электромагнитной

энергии, проходящей через элементарный объем; $\int_V p_{\Pi} dV$ — объемная плотность мощности потерь, возникших в результате уравновешивания действий сил Лоренца силами Кулона при движении

¹ трубчатым

² ниже будем говорить только об электронах, как элементарных, отрицательно заряженных квазичастицах

отрицательно заряженных квазичастиц в электрическом поле; $\int_V p_{\text{CT}} dV$ — мощность сторонних сил, обусловленная объемной плотностью мощности сторонних сил в элементарном объеме (за счет силового действия подводимой к исследуемому материалу энергии магнитного поля),

В дифференциальной форме закон сохранения электромагнитной энергии имеет вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{\Pi} + \frac{\partial \omega}{\partial t} + p_{\Pi} = p_{\text{CT}}, \quad (4)$$

где $\operatorname{div} \mathbf{\Pi}$ — дивергенция вектора Пойнтинга; $p_{\Pi} = \lim_{\{V\} \rightarrow \{\Delta_V\}} \frac{P_{\Pi}}{V}$ — объемная плотность мощности потерь, определяемая как отношение мощности потерь к объему, причем значение объема выбирается как можно малым, т.е. $\{V\} \rightarrow \{\Delta_V\}$ где $\{\Delta_V\}$ — предельное (весьма малое) числовое значение объема; $p_{\Pi} = \lim_{\{V\} \rightarrow \{\Delta_V\}} \frac{P_{\Pi}}{V}$ — объемная плотность мощности сторонних сил, определяемая как отношение мощности этих сил к объему.

Закон сохранения энергии электромагнитного поля устанавливает баланс мощностей в произвольном объеме электромагнитного поля и может быть сформулирован следующим образом [13]: «небаланс мощности в заданном объеме V компенсируется потоком вектора Пойнтинга, направленным внутрь объема (знак « \leftarrow ») через замкнутую поверхность S , ограничивающую этот объем».

Из теоремы Умова – Пойнтинга вытекает важный теоретический вывод, что электрическая энергия от генератора к приемнику передается не по проводам линии электропередачи, а электромагнитным полем, окружающим эти провода, а сами провода выполняют иные функции: 1) создают условия для получения электромагнитного поля, 2) являются направляющими для потока электроэнергии [13].

Математически теорема Умова – Пойнтинга выражает закон сохранения энергии в электромагнитном поле. Теорема представляет собой своеобразное уравнение энергетического баланса в теории поля подобно уравнению баланса мощностей в электрических цепях [14].

2.2. Требования к используемой механической системе и к материалу, из которого она создана

Известно, что энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой [15].

Перенести или передать энергию и информацию через материал произвольной формы, в том числе и через диэлектрик, просто невозможно. Исследования показали, что материал должен иметь определенную форму, обеспечивающую непрерывный перенос энергии и информации сквозь него. Высокая точность реализации явления переноса энергии и информации сквозь любой материал возможна при выполнении ряда закономерных требований:

во-первых, конструктивно материал должен быть представлен в виде пассивной плоской механической системы замкнутого типа. Это обстоятельство объясняется фундаментальными доводами: «в замкнутой системе энергия может переходить из одних видов в другие и передаваться от одного тела к другому, но ее общее количество остается неизменным» [14, 15]. На этот аспект указывали еще в XIX веке немецкие ученые Ю. Майер и Г. Гельмгольц. Как отмечается в цитируемых работах, фундаментальный закон сохранения и превращения энергии справедлив и для систем элементарных частиц разных веществ и материалов. Это особенно важно при исследованиях энергий Ферми и Ландау любых листовых материалов на основе явления переноса;

во-вторых, механическая система замкнутого типа должна иметь априори заданные конфигурацию, площадь, объем, площадь поверхности и толщину, а также известную плотность зарядов в единице объема;

в-третьих, поверхность материала плоской механической системы должна иметь высокий класс чистоты обработки, по-нашему мнению — быть «чистой» или «очень чистой» (— эталонная поверхность). Полагаем, что тип направлений неровностей должен быть параллельным или перпендикулярным плоскости поверхности механической системы. Соответствующие технические характеристики приводятся в работе [16]. Это требование обеспечивает достижение высокой точности переноса энергии и информации;

в-четвертых, высокая точность изготовления пассивной механической системы замкнутого типа предполагает преимущественное использование технологии лазерной резки материалов по априори заданным чертежам;

в-пятых, при решении измерительных задач, явление переноса энергии и информации связано с использованием материала с высокой подвижностью квазичастиц и их большой объемной плотностью. Это обусловлено необходимостью получения высокой чувствительности измерений. В этом случае предпочтительным является изготовление механических систем замкнутого типа из таких листовых материалов, как медь, серебро и их сплавы;

в-шестых, при прямых измерениях энергии Ферми и энергий дискретных энергетических уровней Ландау проводников, полупроводников, диэлектриков и других разновидностей материалов, необходимо изготовление из них стандартных образцов (СО) пассивных механических систем замкнутого типа с идентичной конфигурацией, одинаковой площадью поверхности и качеством ее обработки, а при избыточных измерениях еще и СО разного объема (толщины).

В физическом эксперименте нами использовалась пассивная механическая система замкнутого типа, изготовленная из образца материала (ОМ) в виде плоского симметричного двухконтурного резонатора (или волновода), точнее — в виде двух идентичных плоских и параллельно соединенных между собой медных одновитковых контуров.

2.3. Закон сохранения и превращения механической энергии. Перенос энергии сквозь материал, из которого изготовлена механическая система замкнутого типа

Как было подчеркнуто выше, фундаментальный закон сохранения и превращения энергии, в том числе и механической, справедлив и для систем элементарных заряженных квазичастиц.

Закон сохранения механической энергии связан с однородностью времени, т.е. с инвариантностью физических законов относительно выбора начала отсчета времени.

Напомним, что механические системы, на квазичастицы которых действуют только консервативные силы (внутренние кулоновские и магнитные), называются консервативными системами. Системы, в которых механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие виды энергии, например, в тепловую, называются диссипативными (диссипация — рассеяние энергии). Строго говоря, все системы в природе являются диссипативными и в них закон сохранения механической энергии нарушается. Однако, при изменении механической энергии всегда возникает эквивалентное количество энергии другого вида. Энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой. В этом и состоит физическая сущность закона сохранения и превращения энергии — сущность неуничтожимости материи и ее движения.

Покажем, что благодаря закону сохранения и превращения механической энергии осуществляется перенос энергии заряженных квазичастиц по замкнутому контуру механической системы.

Важной особенностью закона сохранения механической энергии является то, в том числе и для системы из n квазичастиц материала (вещества), движущихся по замкнутому контуру, что он устанавливает связь между координатами и скоростями отрицательно заряженных квазичастиц в двух разных точках траектории их движения.

Известно [15, 16, 18], что при скорости движения квазичастиц намного меньшей скорости света, т.е. при $v \ll c$, их массы постоянны и равны между собой, т.е. $m_{e1} = m_{e2} = \dots = m_{en} = m_e$, как равны между собой и равнодействующие внутренних кулоновских сил, т.е. $F_{\pi 1} = F_{\pi 2} = \dots = F_{\pi n} = F_{\pi}$. При силовом воздействии импульсного магнитного поля высокой частоты на квазичастицы их скорости выравниваются, т.е. $v_{e1} = v_{e2} = \dots = v_{en} = v_e$. При этом выравниваются равнодействующие внешних консервативных ($F_{k1} = F_{k2} = \dots = F_{kn} = F_k$) и внешних неконсервативных ($F_{m1} = F_{m2} = \dots = F_{mn} = F_m$) сил [17]. Тогда, согласно второму закону Ньютона, уравнение движения каждой i -й квазичастицы имеет вид:

$$m_{ei} \frac{dv_{ei}}{dt} = F_{ki} + F_{\pi i} + F_{mi}. \quad (5)$$

При движении под действием сил магнитного поля, квазичастицы за интервал времени dt совершают перемещения $dl_1 = dl_2 = \dots = dl_n = dl_e$. Умножим левую и правую части равенства (5) на соответствующее перемещение, получим:

$$m_{ei} \frac{dv_{ei}}{dt} dl_{ei} = (F_{ki} + F_{\pi i}) dl_{ei} + F_{mi} dl_{ei}. \quad (6)$$

При постоянной скорости движения квазичастиц их перемещение зависит от времени, т.е. $dl_{ei} = v_{ei} dt$. Подставив равенство $dl_{ei} = v_{ei} dt$ в (6), получим приращение кинетической энергии для i -й квазичастицы в виде

$$m_{ei} (v_{ei} \cdot dl_{ei}) = (F_{ki} + F_{\pi i}) \cdot dl_{ei} + F_{mi} \cdot dl_{ei}. \quad (7)$$

Для системы из n движущихся квазичастиц приращение кинетической энергии равно:

$$\sum_{i=1}^n m_{ei} (v_{ei} dv_{ei}) = \sum_{i=1}^n (F_{ki} + F_{\pi i}) dl_{ei} + \sum_{i=1}^n F_{mi} dl_{ei}. \quad (8)$$

Левая часть равенства (8) представляет собой приращение кинетической энергии системы:

$$\sum_{i=1}^n m_{ei} (v_{ei} dv_{ei}) = \sum_{i=1}^n d \left(\frac{m_{ei} v_{ei}^2}{k_2} \right) = dE_K, \quad (9)$$

где $k_2 = 2$.

В правой части равенства (8) первый член характеризует элементарную работу внутренних и внешних консервативных сил, т.е. равен элементарному приращению потенциальной энергии:

$$\sum_{i=1}^n (F_{ki} + F_{\pi i}) dl_{ei} = dE_{\pi}. \quad (10)$$

где F_{ki} — равнодействующая внешних консервативных сил, действующих на каждую квазичастицу и обеспечивающих их движение, а $F_{\pi i}$ — равнодействующая внутренних консервативных сил (постоянных

потенциальных полей, кулоновских сил).

Второй член правой части равенства (8) описывает работу $dA = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{Mi} \cdot d\mathbf{l}_{ei}$ внешних

неконсервативных сил (электромагнитного поля высокой частоты), действующих на механическую систему.

В целом, изменение полной энергии системы из n квазичастиц равно изменению энергии внешних неконсервативных сил, т.е.

$$d(E_K + E_{\Pi}) = dA. \quad (11)$$

Согласно [18], переход n заряженных квазичастиц, движущихся по замкнутому контуру механической системы из одного состояния (обозначим через 1) в другое состояние (обозначим через 2) совершается за счет работы внешних неконсервативных сил (например, за счет магнитной индукции импульсного электромагнитного поля высокой или сверхвысокой частоты и описывается уравнением величин

$$\int_1^2 d(E_K + E_{\Pi}) = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{Mi} \cdot d\mathbf{l}_{ei12} = n(\mathbf{F}_M \cdot d\mathbf{l}_{e12}) = A_{12}, \quad (12)$$

где \mathbf{F}_M — равнодействующая внешних неконсервативных сил (сил индукции магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты), действующих на каждую квазичастицу; $d\mathbf{l}_{ei12}$ — перемещение квазичастицы под действием сил магнитного поля за интервал времени Δt ; A_{12} — работа, совершаемая внешними неконсервативными силами.

Следовательно, явление передачи энергии отрицательно заряженных квазичастиц сквозь материал описывается с помощью закона сохранения механической энергии. Только этот закон позволяет получить связь между координатами и скоростями заряженных квазичастиц в двух разных точках траектории их движения, причем нет необходимости в анализе закона движения квазичастицы во всех промежуточных точках.

Согласно (12), изменение полной энергии движения n отрицательно заряженных частиц по замкнутому контуру механической системы при переходе из одного состояния в другое равно работе, совершенной внешними неконсервативными силами, т.е. силами индукции магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты. Если эти силы отсутствуют, то из (12) следует, что

$$d(E_K + E_{\Pi}) = 0, \quad (13)$$

откуда полная энергия системы квазичастиц останется величиной постоянной (неизменной)

$$E_K + E_{\Pi} = W = \text{const}. \quad (14)$$

Равенство (14) описывает закон сохранения энергии квазичастиц в материале (веществе), согласно которому сумма кинетической и потенциальной энергии отрицательно заряженных квазичастиц материала механической системы замкнутого типа, в которой действуют только консервативные силы, остается постоянной.

Таким образом, энергия заряженных квазичастиц консервативной системы замкнутого типа не изменяется в процессе их движения.

Если на заряженные квазичастицы материала (вещества) механической системы замкнутого типа действуют непотенциальные (консервативные) силы, например, силы вихревого электрического поля, то в этом случае изменение полной энергии заряженных квазичастиц равно работе неконсервативных сил, действующих на эти квазичастицы:

$$\Delta W_K + \Delta W_{\Pi} = \sum_{i=1}^n A_{in}, \quad (15)$$

где индекс «н» — первая буква слова «неконсервативные».

Равенство (15) выражает закон изменения полной энергии движущихся заряженных квазичастиц в механической системе замкнутого типа, т.е. представляет собой своего рода закон сохранения энергии движения квазичастиц при действии на них неконсервативных сил.

Для того, чтобы убедиться в справедливости утверждений о том, что переход движущихся заряженных квазичастиц механической системы замкнутого типа из одного состояния в другое состояние осуществляется за счет работы, совершаемой внешними неконсервативными силами (силовым действием импульсного электромагнитного поля высокой или сверхвысокой частоты), необходимо создать условия для обнаружения и объективного (визуального) определения числового значения совершаемой работы. Для этого используется закон электромагнитной индукции Фарадея.

2.4. Закон электромагнитной индукции Фарадея

В 1831 г. английским физиком М.Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции. Оно проявляется в возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур. Им экспериментально было установлено, что при изменении магнитного потока в проводящем контуре возникает ЭДС индукции \mathcal{E} , равная скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус [19]:

$$\mathcal{E} = -d\Phi/dt, \quad (16)$$

где Φ — магнитный поток, описываемый уравнением величин

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha; \quad (17)$$

S — площадь поверхности контура, пронизываемая магнитным потоком; B — модуль вектора магнитной индукции; α — угол между вектором \mathbf{B} и нормалью \mathbf{n} к плоскости контура.

Уравнение величин (17) описывает закон электромагнитной индукции Фарадея. Позднее, в 1833 году, Э. Ленцем было сформулировано следующее правило: «индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток».

Д. Максвелл в 1861 году в своей работе «О физических силовых линиях» обратил внимание на тот факт, что закон Фарадея в одном уравнении (14) описывает два разных явления: «двигательную ЭДС», генерируемую действием магнитной силы на движущиеся квазичастицы, и «трансформаторную ЭДС», генерируемую действием электрической силы вследствие изменения магнитного поля.

В этом случае закон Фарадея формулируется следующим образом [20]: «циркуляция вектора напряженности сторонних сил (неэлектрического происхождения) равна ЭДС, действующей в замкнутой цепи приемного контура (алгебраической сумме ЭДС)».

В качестве сторонних сил неэлектрического происхождения используются силы, обусловленные составляющей вектора магнитной индукции, полученной за счет движения заряженных квазичастиц в электрическом поле вещества (материала), и составляющей вектора индукции магнитного поля, полученной за счет движения заряженных квазичастиц по замкнутому приемному колебательному контуру,

В этом случае закона Фарадея запишется в виде

$$\oint_L (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \oint_L (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = \int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S}, \quad (18)$$

где $d\mathbf{l}$ — весьма малый по значению и независимый от времени элемент контура L кривой, ограничивающей неизменную во времени поверхность S ; $d\mathbf{S}$ — весьма малый по значению элемент поверхности S . Согласно теореме Кельвина – Стокса [20] имеем:

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\oint_S \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad (19)$$

т.е. циркуляция векторного поля вдоль замкнутого контура $\partial\Sigma$ равна потоку ротора (вихря) поля через поверхность S , ограниченную этим контуром.

Уравнение величин (19) описывает явление электромагнитной индукции (закон Фарадея) и устанавливает количественную связь между электрическими и магнитными полями: переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле. В этом физический смысл уравнения величин (19) [19, 20].

Подставляя правую часть равенства (19) в (18), окончательно получим аналитическое выражение закона Фарадея в общем виде:

$$\oint_L (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} + \oint_L (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S}. \quad (20)$$

При определении ЭДС выбор пути $L(t)$, связанного со временем движения квазичастиц с конечной скоростью, должен осуществляться при выполнении следующих условий:

Первое, — путь движения квазичастиц должен быть замкнутым, поскольку только в механических системах замкнутого типа проявляется действие закона сохранения энергии движущихся заряженных квазичастиц.

Второе, — путь должен охватывать относительное движение всех квазичастиц материала, из которого выполнен контур механической системы.

Третьим, весьма важным условием, которым зачастую пренебрегают физики, является условие, что «путь должен совпадать с направлением течения тока». В противном случае получают ЭДС, которая, «возможно, будет не той (природы) ЭДС, которую вызывает ток». Причем результат определения ЭДС может быть получен с погрешностью, обусловленной не совпадением направлений течения основных и сторонних токов по контуру материала механической системы замкнутого типа.

Четвертым условием высокоточного определения ЭДС является неизменность траектории (постоянство пути) движения отрицательно заряженных квазичастиц материала.

Пятым — условие зеркальной симметрии механической системы замкнутого типа, т.е. выполнение ее, например, в виде двух идентичных плоских пассивных колебательных контуров. Это необходимо для обеспечения одинаковых условий переноса и приема энергии отрицательно заряженных квазичастиц, т.е. повышения точности определения ЭДС.

2.5. Второй закон Ньютона

При описании явления передачи энергии и информации важная роль отводится второму закону Ньютона, связывающему силу F_e , действующую на квазичастицу, с ускорением a_e . Согласно [21], в

инерциальных системах отсчета ускорение, приобретаемое квазичастицей, прямо пропорционально вызывающей его силе, не зависит от её природы, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе квазичастицы.

В описываемом явлении передачи энергии и информации на отрицательно заряженные квазичастицы действует импульсное магнитное поле в течение нечетных полупериодов электрического тока высокой или сверхвысокой частоты (типа меандр). В течение четных полупериодов квазичастицы с массой m_e движутся по инерции. Согласно второму закону Ньютона это движение является равноускоренным, так как имеет место экспериментально проверяемое утверждение Ньютона о пропорциональности ускорения вызывающей его силе, т.е. о линейности соотношения «сила-ускорение» ($a_e = F_e/m_e$). [21]. С другой стороны, по второму закону Ньютона можно определить значение инертной массы, характеризующей динамические свойства квазичастицы, через отношение силы к ускорению ($m_e = F_e/a_e$).

2.6. Сила Лоренца и сила Ампера

Вектором напряженности электрического поля называется сила, действующая на единичный электрический заряд [19, 22]:

$$\mathbf{F}_e = q_1 \mathbf{E}, \quad (21)$$

где q_1 — единичный электрический заряд, взаимодействующей с электрическим полем, Кл;

Следует помнить, что этот заряд не должен искажать электрическое поле. Для определения напряженности электрического поля необходимо, чтобы минимальная по значению сила, действующая на пробный электрический заряд (квазичастицу), была нормированной и определяемой, с заданной точностью, по измерительному прибору.

Согласно (21), вектор напряженности электрического поля воздействует на любой заряд. Это дает возможность использовать электрическое поле для увеличения или уменьшения скорости движения потока отрицательно заряженных квазичастиц по замкнутому контуру механической системы.

Вектором магнитной индукции называется сила, действующая на единичный электрический заряд, движущийся с единичной скоростью:

$$\mathbf{F}_M = q_1 [\mathbf{v}_1 \times \mathbf{B}], \quad (22)$$

где \mathbf{v}_1 — вектор единичной скорости движения заряженной квазичастицы, м/с; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции, Т.

Следует помнить, что электрическое поле действует на любые заряды, — движущиеся и неподвижные, а магнитное — только на движущиеся.

На электрический заряд, находящийся в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}], \quad (23)$$

где q — электрический заряд (например, заряд квазичастицы), взаимодействующей с электрическим полем, Кл; \mathbf{v} — вектор скорости движения заряженной квазичастицы, м/с.

Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения заряда и не совершает работы, поскольку не изменяет скорость заряда и его кинетическую энергию [23, 24].

Макроскопическим проявлением силы Лоренца является сила Ампера. Аналитическое выражение для силы Ампера $d\mathbf{F}$, с которой магнитное поле действует на элемент объема dV проводника (материала) с плотностью тока \mathbf{J} , находящегося в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , имеет вид: $d\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV$ [23].

Модуль силы Ампера находится согласно уравнению величин:

$$F_A = I \cdot B \cdot L \cdot \cos \alpha, \quad (24)$$

где α — угол между вектором магнитной индукции и направлением, вдоль которого течёт ток.

Сила Ампера — сила, действующая на находящийся в магнитном поле материал, по замкнутому контуру которого течет ток (движется поток отрицательно заряженных квазичастиц). Эта сила максимальна при расположении указанного материала перпендикулярно линиям магнитной индукции ($\alpha = 90^\circ$):

2.7. Понятие соленоидального векторного поля

Решение задачи переноса энергии и информации через материал (вещество) не возможно без формирования соленоидального магнитного поля. Рассмотрим сущность данного понятия и его математическую интерпретацию.

Согласно [25, 26], векторное поле \mathbf{a} называется соленоидальным или вихревым, если через любую замкнутую поверхность S его поток равен нулю, т.е. $\int_S \mathbf{a} \cdot d\mathbf{S} = 0$. Соленоидальное поле — это трубчатое

поле направленного действия (векторное), теоретически не имеющее ни источников, ни стоков. Дивергенция вектора \mathbf{a} соленоидального поля равна нулю во всех его точках ($\text{div} \mathbf{a} = 0$).

Соленоидальное магнитное поле — трубчатое векторное поле с нулевой расходимостью входящего и исходящего потоков. Примером является магнитное поле внутри бесконечно длинного соленоида. Для него $\text{div} \mathbf{B} = 0$, где \mathbf{B} — вектор магнитной индукции. Равенство дивергенции нулю означает, что соленоидальное поле свободно от источников. Соленоидальное магнитное поле — вихревое векторное поле,

которое характеризуется так называемым векторным потенциалом — функцией (\mathbf{A}) такой, что $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$.

Для соленоидального магнитного поля справедлив принцип сохранения интенсивности трубчатого векторного поля («векторной трубки»): в соленоидальном магнитном поле потоки трубчатого векторного поля через различные его поперечные сечения (сечения «векторной трубки») равны между собой по интенсивности (сохраняют постоянное значение).

Известно, что энергия магнитного поля равна работе, которую затрачивает ток на создание этого поля [27]. Действительно, если по контуру с индуктивностью L_0 течет ток I_x , то магнитный поток, сцепленный с данным контуром, опишется уравнением величин $\Phi_x = L_0 I_x$. Изменение тока на dI_x приводит к изменению магнитного потока на $d\Phi_x = L_0 dI_x$. При этом будет совершена работа $dA_x = I_x \cdot d\Phi_x = L_0 I_x dI_x$. Полная работа по созданию магнитного потока Φ_x определяется согласно уравнению величин

$$A_x = \int_0^{I_x} I_x \cdot d\Phi_x = \int_0^{I_x} L_0 I_x dI_x = \frac{L_0 I_x^2}{k_2}, \quad (25)$$

где $k_2 = 2$.

Следовательно, энергия магнитного поля равна

$$W_x = \frac{L_0 I_x^2}{k_2}. \quad (26)$$

Выразим энергию однородного магнитного поля внутри длинного соленоида через величины, характеризующие это поле в окружающем пространстве.

Индуктивность соленоида определяется согласно уравнению величин [27]:

$$L_0 = \mu\mu_0 N^2 \frac{S_0}{l_0}, \quad (27)$$

где S_0 и l_0 — соответственно площадь поперечного сечения соленоида и его длина.

В этом случае энергия магнитного поля соленоида определяется по уравнению величин

$$W_x = \frac{\mu\mu_0 N^2 I_x^2}{k_2 l_0} S_0. \quad (28)$$

Исследования магнитопольных измерений показали целесообразность формирования и использования в контуре соленоида тока высокой частоты и прямоугольной формы, т.е. типа меандр. Такой ток описывается уравнением величин

$$I_x(t) = I_m \left(\frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\omega_0 t}{k_2 n - 1} \right), \quad (29)$$

где $k_2 = 2$, ω_0 — частота следования прямоугольных импульсов заданного значения, $k_2 n - 1$ — число гармоник.

В этом случае индукция импульсного магнитного поля соленоида описывается уравнением величин

$$B_x(t) = \frac{\mu\mu_0 N}{k_2 l_0} I_m \left(\frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\omega_0 t}{k_2 n - 1} \right). \quad (30)$$

Ее значение пропорционально амплитуде тока через контур, числу витков соленоида и обратно пропорционально длине соленоида.

Вектор магнитной индукции \mathbf{B}_x является фундаментальной характеристикой магнитного поля. Именно он определяет силу действия магнитного поля на движущиеся заряженные квазичастицы и токи и может быть непосредственно измерен. Уравнение величин (30) используется при описании процесса передачи энергии и информации по замкнутому контуру механической системы, выполненной из металлов и их сплавов.

При использовании механической системы, выполненной из диэлектрика, в расчетах используется понятие напряженность магнитного поля H , Поскольку $B = \mu\mu_0 H$, то, с учетом (27), запишем

$$H_x(t) = \frac{N}{k_2 l_0} I_m \left(\frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\omega_0 t}{k_2 n - 1} \right). \quad (31)$$

Напряжённость магнитного поля обычно рассматривают как вспомогательную величину, которую проще рассчитать, например, в статическом режиме. В этом и состоит её ценность. С другой стороны, напряженность магнитного поля создают так называемые свободные токи, которые сравнительно легко непосредственно измерить. В то же время не учитываются трудно измеряемые связанные токи, т. е. молекулярные токи и т. п.

С учетом $B = \mu\mu_0 H$ и (31), уравнение величин для энергии магнитного поля соленоида, выраженное через параметры соленоида и индукцию магнитного поля, примет вид:

$$W_x = \frac{[B_x(t)]^2}{k_2 \mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0}{k_2} \frac{NV_0}{l_0} B_m^2 \left(\frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\alpha_0 t}{k_2 n - 1} \right)^2, \quad (32)$$

где B_m — амплитуда импульсов магнитной индукции (— силовой характеристики магнитного поля); $V_0 = S_0 l_0$ — объем соленоида.

Следует помнить, что в уравнение величин (32) включена не только энергия собственного поля соленоида, но и энергия, затраченная на поляризацию среды. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%B6%D1%91%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8F - cite_note-1

При учете энергии, затраченной на поляризацию материала или вещества, на которые воздействует импульсное магнитное поле, полная энергия магнитного поля описывается, через его напряженность и магнитную проницаемость, уравнением величин

$$W_x = \mu\mu_0 \frac{H_m^2}{k_2} \left(\frac{1}{k_2} + \frac{k_2}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(k_2 n - 1)\alpha_0 t}{k_2 n - 1} \right)^2 V_0, \quad (33)$$

где H_m — амплитуда импульсов напряженности магнитного поля, т.е. пропорционально квадрату напряженности магнитного поля и линейно зависит от магнитной проницаемости материала или вещества.

3. Три проявления явления переноса (и приема) энергии и информации

Открытый нами магнитолевой эффект [28] описывает явление переноса энергии и информации. В настоящее время выделено три проявления явления переноса (и приема) энергии и информации:

1) перенос через проводящую вещественную среду (материал или вещество) энергии и информации о физическом свойстве определенного материального объекта, процесса, физического явления, ее преобразование на приемной стороне и получение в количественном выражении в виде постоянного тока или напряжения;

2) перенос информации о скрытой энергии Ферми любых материалов или веществ микро- и макромира и ее представление на приемной стороне в количественном выражении в виде электрического тока или напряжения;

3) передача информации о дискретных энергетических уровнях Ландау проводящих и слабо проводящих материальных сред (материалов или веществ) микро- и макромира и оценивание дискретных значений энергий этих материалов, с учетом полосы неопределённости, в моменты времени излучения радиоимпульса.

Установлено, что реализация третьего проявления явления передачи информации отличается от первых двух необходимостью выполнения дополнительных требований к изготовлению механической системе с излучающим колебательным контуром (антенной) и к способу излучения энергии магнитного поля высокой частоты.

Первооснову (предтечу) явления переноса информации материалом или веществом составляет магнитолевой эффект, который проявляется в движении квазичастиц и модуляции скорости их движения под действием импульсного магнитного поля высокой частоты.

4. Проблемы измерения энергий Ферми и Ландау

Выделим основные проблемы измерения энергий Ферми и Ландау простых и сложных веществ микро- и макромира, — металлов и неметаллов, органических и неорганических веществ [29]:

1. Проблема установления физического принципа (явления или эффекта), который может быть положен в основу метода измерения скрытой внутренней энергии Ферми исследуемых образцов¹ (ИО) материалов, а также энергии дискретных энергетических уровней Ландау (сокращенно — энергий Ферми и Ландау) при нормальных условиях эксплуатации этих материалов.

2. Проблема использования известного явления или эффекта, обеспечивающего управляемое целенаправленное силовое воздействие на заряженные квазичастицы ИО материала. Эффект должен обеспечивать перенос, например, энергии отрицательно заряженных квазичастиц ИО материала из одной части его объема в другую или изменение их объемной концентрации внутри материала.

3. Проблема создания такого магнитолевого воздействия, при котором происходит формирование линейного дискретно движущегося (шаг за шагом) потока заряженных квазичастиц, создаваемого определенными видами токов в ИО материала.

4. Проблема создания стандартных образцов (СО) материалов, нормированных по значению скрытой энергии Ферми и соответствующих стандартов на их конструкцию, форму, типоразмер, способ изготовления и т.д.

¹ в том числе и из биоматериалов

В рассматриваемом случае СО — средство измерений, изготовленное определенным способом из материала известной марки, структуры, шероховатости, конфигурации, формы и типоразмеров, предназначенное для воспроизведения и хранения физической величины — «энергии Ферми» заданного размера (числового значения), характеризующей общие энергетические свойства этого материала.

5. Проблема создания государственных стандартов, руководящих технических материалов и требований по изготовлению механических систем из ИО материалов разного вида или марки. Эти образцы должны иметь заданное количество электронов в единице объема и значение их подвижности, иметь определенную конфигурацию, толщину, чистоту обработки (шероховатость поверхности) и т.д., в зависимости от решаемой измерительной задачи.

6. Проблема высокоточной передачи энергии неоднородного высокочастотного электромагнитного поля, созданного в результате движения отрицательно заряженных частиц по замкнутому контуру механической системы, в приемный колебательный контур.

Эта проблема связана с высокоточным преобразованием электрических токов переноса (проводимости, конвекции), обусловленных движением несвязанных отрицательно заряженных квазичастиц в механической системе замкнутого типа, а также токов смещения, обусловленных смещением взаимосвязанных заряженных частиц (молекул, гидроксильных групп и т. п.) в соответствующие магнитные поля.

7. Проблема высокоточного съема информации об энергиях Ферми и Ландау, связанная с корректным воспроизведением явления электромагнитной индукции и учета нелинейности силовых линий магнитного поля.

Ее решение возможно при использовании симметричной и идентичной по параметрам приемной части контура механической системы замкнутого типа по отношению к его передающей части.

8. Проблема разработки универсального способа измерения энергий Ферми и Ландау, т.е. способа, инвариантного к физической природе материалов, — будь-то: металлы или диэлектрики, материалы с разной структурой, наноматериалы, композитные материалы и другие.

9. Проблема обеспечения единства измерений, повторяемости и качества измерений.

В этой связи актуальна задача исключения влияния внешних магнитных полей на искусственно созданные, задача подготовки образцов исследуемого материала с нормированными геометрическими размерами и чистотой обработки поверхности (если не ставится задача измерения шероховатости материала), задача установления оптимальных параметров импульсного магнитного поля высокой или сверхвысокой частоты, задача линеаризации передаточной функции и др.

10. Проблема формирования радиоимпульса и передачи его энергии в открытое пространство.

Переход электронов с одного дискретного энергетического уровня на другой осуществляется мгновенно в момент времени превышения энергии E_{n2} второго дискретного энергетического уровня энергии E_{n1} первого энергетического уровня (индекс «п» — первая буква слова «пороговый»). При этом переходе происходит излучение возбужденными атомами электромагнитной волны. Как известно [30], атом излучает лишь тогда, когда электрон скачком переходит из одного состояния с большей энергией в другое, с меньшей энергией. При этом частота излучения i -го свободного электрона определяется уравнением величин:
$$\nu_i = \frac{E_{mi} - E_{ni}}{h} \quad \text{при} \quad E_{mi} > E_{ni}.$$
 При каждом переходе электрона имеет место излучение

определенной частоты. Однако для k отрицательно заряженных квазичастиц (электронов), переходящих с одного дискретного энергетического уровня Ландау на другой, спектр излучения атомов представляет собой не набор спектральных линий, а сплошной (полосовой) спектр, отличающийся начальным и конечным значениями частот одной или нескольких полос. Это объясняется тем, что в жидких и твердых телах, где частицы сильно взаимодействуют друг с другом, энергия каждой частицы включает в себя и энергию ее взаимодействия с другими частицами. Поскольку энергия взаимодействия квазичастиц может иметь самые разные значения, то вместо отдельных энергетических уровней образуются сплошные полосы возможных энергетических состояний.

Интенсивность излучения может быть самой различной; спектр излучения получается сплошным и полосовым. Причем атомы поглощают только такие электромагнитные волны (лучи), которые могут сами испускать [24]. Следовательно, для k электронов, переходящих с одного дискретного энергетического уровня Ландау на другой, спектр излучения атомов представляет собой не линии, а набор спектральных полос в диапазоне частот.

С помощью антенны, которая представляет собой контур ударного возбуждения, формируется и излучается радиоимпульс, суммарная энергия и спектр которого определяются: а) энергией излучения каждого атома материала при переходе его из возбужденного состояния в исходное, когда все свободные электроны с одного энергетического уровня переходят на другой и 2) параметрами приема-передающей антенны, являющейся элементом связи физической системы замкнутого типа с окружающей средой;

5. Условия решения проблемы измерений энергий Ферми и Ландау

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что основными условиями решения проблемы измерения энергий Ферми и Ландау являются:

представление СО и ИО материалов в виде пассивных механических систем (в частном виде — в

виде волноводов, резонаторов, пассивных радиотехнических систем и т.д.). При этом, механическая система принципиально должна: представлять собой ИО материала определенного вида, конфигурации, типоразмеров, чистоты обработки поверхности и иметь нормированное значение концентрации примесей;

механическая система должна быть системой замкнутого типа и иметь несколько центров симметрии, например, два локальных и один общий;

при измерениях энергии Ферми механическая система должна представлять собой систему закрытого от действия внешних магнитных полей типа, т.е. иметь защитные магнитные экраны;

в случае измерения энергии дискретных энергетических уровней Ландау механическая система должна перестраиваться в систему открытого типа, обеспечивающую излучение энергии радиоимпульсов в открытое пространство.

Для решения задачи измерения энергий Ферми и Ландау необходимость выполнения указанных требований обусловлена тем, что замкнутые механические системы играют фундаментальную роль в изучении свойств материалов и обеспечивают чистоту эксперимента. Ведь под действием магнитного поля энергия движения квазичастиц в такой системе сохраняется на протяжении всего времени, в течение которого система является замкнутой [18]. Только в механических системах замкнутого типа действует закон сохранения энергии.

Изготовление образцов зеркально симметричных объектов исследований единой конфигурации и заданных размеров обусловлено существованием в природе принципа симметрии объектов, систем и описываемых их физических законов. Различным симметриям физических законов в природе соответствуют определенные законы сохранения, в частности, энергии. С другой стороны, симметрия относительно зеркального отражения означает, что физические законы не меняются при замене левого отражения на правое, а правого на левое [31].

Выполнение описанных условий и изготовление зеркально симметричных ИО и схемотехнических решений дало возможность реализовать метод измерений на новом физическом принципе, сохранить чистоту эксперимента, обеспечить единство измерений и сходимость результатов измерений.

Дополнительная защита ИО материалов от действия внешних магнитных полей необходима для обеспечения проявлений фундаментальных свойств материальных квазичастиц ИО материала, высокой разрешающей способности, заданной точности и достоверности измерений, а также исключение действия сторонних неконсервативных сил на механическую систему..

Проблема съема информации решается при разработке такого схемотехнического решения, при котором приемная часть не вносит затуханий (и потерь) в преобразуемый сигнал и является симметричной входному воздействию.

Проблема разработки универсального способа измерения энергий Ферми и Ландау безусловно является актуальной, поскольку направлена на решение важнейших проблем фундаментальной метрологии, которые еще не решены в теории и мировой практике приборостроения. Данная проблема связана и с трудностями создания высокоточных и стабильных сенсоров (датчиков) микротока.

Магнитопольные методы и средства измерений описываются в последующих публикациях.

Выводы. Рассмотрены явления движения заряженных квазичастиц, связанные с такими понятиями, как ток проводимости, ток переноса и ток смещения. Приведены их научные определения. В частности, например, утверждается, что в теории магнитопольных измерений целесообразно использовать понятия «ток переноса» и «ток смещения».

Рассмотрена сущность явления переноса энергии и информации сквозь вещество и условия его осуществления.

Описаны фундаментальные законы магнетизма и электродинамики, положенные в основу явления переноса энергии и информации.

Установлено шесть основных требований к материалам, используемым для передачи энергии и информации через них.

Показано, что явление передачи энергии отрицательно заряженных квазичастиц сквозь материал описывается с использованием законов сохранения энергии электромагнитного поля и закона сохранения энергии движения по замкнутому контуру n заряженных квазичастиц.

Показано, что только с помощью закона сохранения механической энергии устанавливается связь между координатами и скоростями движения заряженных квазичастиц в двух диаметрально противоположных (симметричных) точках траектории их движения по замкнутому контуру.

Отмечено важное значение закона электромагнитной индукции Фарадея для решения задачи определения работы, совершаемой движущимися отрицательно заряженными квазичастицами с использованием двух разных явлений: генерации ЭДС под действием магнитной силы на движущиеся заряженные квазичастицы и генерации трансформаторной ЭДС под действием электрической силы вследствие изменения магнитного поля.

Показано, что при описании явления передачи энергии и информации важная роль отводится второму закону Ньютона, связывающему силу, действующую на квазичастицу, с ее ускорением. Установлены условия проявления действия второго закона Ньютона при формировании токов переноса.

Выделено три проявления явления переноса (и приема) энергии и информации:

1) перенос через проводящую среду (материал или вещество) энергии и информации о физических

величинах и представление ее на приемной стороне в количественном выражении в виде тока или напряжения;

2) перенос информации о скрытой энергии Ферми через материал или вещество микро- и макромира;

3) перенос информации о дискретных энергетических уровнях Ландау через материал или вещество микро- и макромира и ее фиксация.

Сформулированы проблемы измерения энергии Ферми и Ландау и условия ее решения.

Таковы сущность явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество, условия и проблемы магнитопольных измерений. Полученные теоретические знания составляют первоосновы и основы магнитопольной теории измерений. Сущность магнитопольных методов будет описана в следующей публикации.

Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 1. Философские аспекты теории / В.Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету : междунар. науч.-тех. журнал. – 2018. – № 4. – С. 222–232.

2. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2. Атрибуты магнитопольных эффектов / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2018. – № 1. – С. 7–14.

3. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология. Магнитопольная теория измерений с использованием явления переноса энергии и информации сквозь материал или вещество. Часть 2.1. Условия проявления магнитопольных эффектов и явлений / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2018. – № 1. – С. 15–31.

4. Физические явления [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.google.com.ua/search?q=%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5+%D1%8F%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F+%D1%8D%D1%82%D0%BE+%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F&sa=X&ved=0ahUKEwiZ_ffIxN_cAhWiJoKHadFVjEQ1QIpgEoAQ&biw=700&bih=378.

5. Электрический ток переноса. Режим доступа. Режим доступа: https://technical_terminology.academic.ru/6614/%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B0.

6. Электрический ток переноса [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfiles.net/preview/1790395/page:5/>.

7. Ток проводимости и ток смещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://official.academic.ru/30225/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B0.

8. Ток смещения (электродинамика) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D0%BA_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_\(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BE%D0%BA_%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0)).

9. Ток смещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://edu.tltsu.ru/er/book_view.php?book_id=14d8&page_id=11998.

10. Кирильчук В.Б. Основы проектирования СВЧ интегральных схем. Часть 1. Основы теории электромагнитного поля [Электронный ресурс] / Кирильчук В.Б., Лихачевский Д.В. – Режим доступа : https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_85510.pdf.

11. Четвертое уравнение Максвелла [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfiles.net/preview/1790395/page:7/>.

12. Закон сохранения электромагнитной энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://know.sernam.ru/book_ter.php?id=29.

13. Теорема Умова – Пойнтинга для электромагнитного поля [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://studopedia.ru/3_43182_teorema-umova-poytinga-dlya-elektromagnitnogo-polya.html.

14. Теорема Гаусса (постулат Максвелла) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfilesnet/preview/5909216/page:5/>.

15. Закон сохранения энергии в механике [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://poznayka.org/s80034t1.html>.

16. Шероховатость поверхности. ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gosthelp.ru/text/GOST278973Sheroxovatosp.html>.

17. Закон сохранения механической энергии и импульса [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://osu.ru/docs/school/physics/physics_3_energy.pdf.
18. Закон сохранения энергии в механике [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://studopedia.ru/4_12_zakon-sohraneniya-energii-v-mehanike.html.
19. Глава 1. Электродинамика. 1.20. Электромагнитная индукция. Правило Ленца [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://physics.ru/courses/op25part2/content/chapter1/section/paragraph20/theory.html>
20. Закон электромагнитной индукции Фарадея [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8_%D0%A4%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B5%D1%8F.
21. Второй закон Ньютона [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0.
22. Описание электромагнитного поля [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://studfiles.net/preview/1790395/page:3/>.
23. Закон Ампера [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%90%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0.
24. Сила Лоренца [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BB%D0%B0_%D0%9B%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B0.
25. Соленоидальное векторное поле [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B8%D0%B4%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5.
26. Соленоидальное поле [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/5204/%D0%A1%D0%9E%D0%9B%D0%95%D0%9D%D0%9E%D0%98%D0%94%D0%90%D0%9B%D0%AC%D0%9D%D0%9E%D0%95.
27. Огурцов А.Н. Физика для студентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/ogurtsov/lect4mag.pdf>.
28. Кондратов В.Т. Магнитопольевой эффект проф. Кондратова В.Т. / В.Т. Кондратов // Матеріали 17-ї МНТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», 8-13 червня 2017 р., м. Одеса (Затока). – С. 64–67.
29. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: проблема измерения энергии Ферми / В.Т. Кондратов // Тезисы докладов 16-й междунар. науч.-техн. конф. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП-15 — 2016), м. Одеса (Затока) 10–15 червня. – С. 27–30.
30. Излучение и поглощение энергии атомами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://tehnar.net.ua/iz_luchenie-i-pogloshhenie-energii-atomami/.
31. Краткая теория [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://citoweb.yyspu.org/link1/metod/met71/node19.html>.

References

1. Kondratov V.T. Fundamental'naya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmereniy s ispol'zovaniyem yavleniya perenosa energii i informatsii skvoz' material ili veshchestvo. Chast' 1. Filosofskiy aspekt teoriy / V.T. Kondratov // Mezhdunar. nauch.-tekhn. zhurnal «Visnik Khmel'nitskogo natsional'nogo universitetu». 2018, №4. — S. 222–232.
2. Kondratov V.T. Fundamental'naya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmereniy s ispol'zovaniyem yavleniya perenosa energii i informatsii skvoz' material ili veshchestvo. Chast' 2. Atributy magnitopolevykh effektov / V.T. Kondratov // Vimiroyuval'na ta obchislyuval'na tekhnika v tekhnologichnikh protsesakh. — 2018. — №1. — S. 7 – 14.
3. Kondratov V.T. Fundamental'naya metrologiya. Magnitopolevaya teoriya izmereniy s ispol'zovaniyem yavleniya perenosa energii i informatsii skvoz' material ili veshchestvo. Chast' 2.1. Usloviya proyavleniya magnitopolevykh effektov i yavleniy / V.T. Kondratov // Vimiroyuval'na ta obchislyuval'na tekhnika v tekhnologichnikh protsesakh. — 2018. — №1. — S. 15 – 31.
4. Fizicheskiye yavleniya. Rezhim dostupa: https://www.google.com.ua/search?q=%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5+%D1%8F%D0%B2%D0%BB%D0%BD%D0%B8%D1%8F+%D1%8D%D1%82%D0%BE+%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%8F&sa=X&ved=0ahUKEwiZ_ffixN_cAhWiIJoKHADFBjEQIQIIpgEoAQ&biw=700&bih=378.
5. Elektricheskiy tok perenosa. Rezhim dostupa. Rezhim dostupa: https://technical_terminology.academic.ru/6614/%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B0.
6. Elektricheskiy tok perenosa. Rezhim dostupa: <https://studfiles.net/preview/1790395/page:5/>.
7. Tok provodimosti i tok smeshcheniya. Rezhim dostupa: https://official.academic.ru/30225/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B0.
8. Tok smeshcheniya (elektrodinamika). Rezhim dostupa: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BA%D0%BA%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_\(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%BA%D0%BA%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F_(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0)).
9. Tok smeshcheniya. Rezhim dostupa: http://edu.tltsu.ru/er/book_view.php?book_id=14d8&page_id=11998.

10. Kiri'l'chuk V.B., Likhachevskiy .D.V. Osnovy proyektirovaniya SVCH integral'nykh skhem. Chast' 1. Osnovy teorii elektromagnitnogo polya. Rezhim dostupa: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_85510.pdf.
11. Chetvertoye uravneniye Maksvella. Rezhim dostupa: <https://studfiles.net/preview/1790395/page:7/>.
12. Zakon sokhraneniya elektromagnitnoy energii. Rezhim dostupa: http://know.sernam.ru/book_ter.php?id=29.
13. Teorema Umova-Poytinga dlya elektromagnitnogo polya. Rezhim dostupa: https://studopedia.ru/3_43182_teorema-umova-poytinga-dlya-elektromagnitnogo-polya.html.
14. Teorema Gaussa (postulat Maksvella). Rezhim dostupa: <https://studfilesnet/preview/5909216/page:5/>.
15. Zakon sokhraneniya energii v mekhanike. Rezhim dostupa: <http://poznayka.org/s80034t1.html>.
16. Sherokhovatost' poverkhnosti. GOST 2789-73 (CT SEV 638-77). Rezhim dostupa: <http://www.gosthelp.ru/text/GOST278973SHerokhovatostpo.html>.
17. Zakon sokhraneniya mekhanicheskoy energii i impul'dsa. Rezhim dostupa: http://osu.ru/docs/school/physics/physics_3_energy.pdf.
18. Zakon sokhraneniya energii v mekhanike. Rezhim dostupa: https://studopedia.ru/4_12_zakon-sohraneniya-energii-v-mekhanike.html.
19. Glava 1. Elektrodinamika. 1.20. Elektromagnitnaya induktsiya. Pravilo Lentsa. Rezhim dostupa: <https://physics.ru/courses/op25part2/content/chapter1/section/paragraph20/theory.html>.
20. Zakon elektromagnitnoy induktsii Faradeya. Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8_%D0%A4%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B5%D1%8F.
21. Vtoroy zakon N'yutona. Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%82%D0%BED1%0%0%BE%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0.
22. Opisaniye elektromagnitnogo polya. Rezhim dostupa: <https://studfiles.net/preview/1790395/page:3/>.
23. Zakon Ampera. Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%90%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0.
24. Sila Lorentsa. Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BB%D0%B0_%D0%9B%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B0.
25. Solenoidal'noye vektornoye pole. Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B8%D0%B4%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5.
26. Solenoidal'noye pole. Rezhim dostupa: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/5204/%D0%A1%D0%9E%D0%9B%D0%95%D0%9D%D0%9E%D0%98%D0%94%D0%90%D0%9B%D0%AC%D0%9D%D0%9E%D0%95.
27. Ogurtsov A.N., Fizika dlya studentov. Rezhim dostupa: <http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/ogurtsov/lect4mag.pdf>.
28. Kondratov V.T. Magnitopolevoy effekt prof. Kondratova V.T. / V.T.Kondratov //Materiali 17-i' MNTK «Vimiryu-val'na ta obchislyuval'na tekhnika v tekhnologichnikh protse-sakh», 8-13 chervnya 2017 r., m. Odesa (Zatoka). 2017 – S. 64-67.
29. Kondratov V.T. Fundamental'naya metrologiya: problema izmereniya energii Fermi / V.T. Kondratov // Tezisy dokladov 16-y mezhdunar.nauch.-tekhn. konf. «Vimiryuval'na ta obchislyuval'na tekhnika v tekhnologichnikh protsesakh» (VOTTP-15 — 2016), m. Odesa (Zatoka) 10-15 chervnya. — S. 27-30.
30. Izlucheniye i pogloshcheniye energii atomami. URL: http://tehnar.net.ua/iz_luchenie-i-pogloshhenie-energii-atomami/.
31. Kratkaya teoriya. URL: <http://cito-web.yspu.org/link1/metod/met71/node19.html>.

Рецензія/Peer review : 14.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 18.9.2018 р.
Статтю представляє Кондратов В.Т.

АЛГОРИТМІЧНІ МЕТОДИ ВИСОКОТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЕНЬ

У статті розглянуто алгоритмічні методи високоточного визначення лінійних прискорень у реальному часі. Основою цих методів є ідентифікація вектору стану чутливого елемента у вимірювачах прискорень, які використовуються в інерціальних та гравіметричних системах. Пропонується використання штучної нейронної мережі для підвищення точності вимірювань у нестационарних та несприятливих умовах.

Ключові слова: прискорення, алгоритмічні методи, штучна нейронна мережа.

O.M. BEZVESILNA
KPI named after Igor Sikorsky

ALGORITHMIC METHODS OF HIGHLY DETERMINATION OF LINEAR ACCELERATIONS

An effective way of increasing the accuracy of linear acceleration meters, as an important part of the gravimetric and navigation systems, is to identify the state sensor of these meters based on algorithmic methods. The solution of the identification problem based on the Kalman filter in real time is obtained. This allows us to estimate the state vector of the sensor in the presence of a deterministic and random nature of the obstacles. The implementation of an artificial neural network identification algorithm is also proposed. Adaptation and optimal configuration of the parameters of the algorithm can be performed in the process of adaptation and training of this network. To estimate the state vector of the sensor, a circuit consisting of delay lines and three adaptive linear neurons was developed. The result is a reduction in the additional measurement error, due to complicated and non-stationary measurement conditions.

Keywords: acceleration, algorithmic methods, artificial neural network.

Вступ. Розвиток сучасних високоточних гравіметричних і навігаційних систем вимагає удосконалення всіх складових елементів цих систем та широкого застосування алгоритмічних методів обробки сигналів і компенсації похибок. Можливості удосконалення конструкції та підвищення точності виготовлення складових елементів на теперішній час практично вичерпані. Тому дуже перспективним і актуальним шляхом є застосування алгоритмічних методів підвищення точності гравіметричних і навігаційних систем.

Все це вимагає створення високоточних і ефективних алгоритмічних методів обробки вихідного сигналу вимірювачів лінійних прискорень, як важливої складової частини гравіметричних і навігаційних систем [1, 2].

Існує багато наукових праць, присвячених теоретичним основам і дослідженню оптимальних і субоптимальних алгоритмів фільтрації дискретних сигналів гравіметричних і навігаційних систем, що містять завади [3–10]. Оскільки завдання оптимальної фільтрації є завданням ідентифікації (оцінки) стану, сформульоване в стохастичних термінах, у подальшому будемо використовувати термін “ідентифікація стану”.

Робота вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих та нестационарних умовах вимірювань супроводжується виникненням ряду завдань, що додаються до вихідного сигналу чутливого елемента (ЧЕ) цих вимірювачів. Наприклад, гармонійна завада може бути обумовлена нестационарним тепловим станом гіроскопічного ЧЕ та впливом періодичних рухів на частоті маятникових коливань ЧЕ [2, 8]. Тому необхідно враховувати всі ці особливості при розробці алгоритмів ідентифікації стану вимірювачів лінійних прискорень з підвищеними метрологічними характеристиками.

Метою даної статті є розробка алгоритмічного методу ідентифікації вектора стану ЧЕ вимірювачів лінійних прискорень. Цей метод забезпечує підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень в несприятливих і нестационарних умовах проведення вимірювань.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Розглянемо алгоритмічні методи підвищення точності ідентифікації стану гіроскопічного ЧЕ у вимірювачі лінійних прискорень. Результатом оцінки стану є ідентифікація кутового положення та параметрів кутового руху ЧЕ $\alpha(t) = \alpha_I + \alpha_{Cj}(t)$. При цьому амплітуда корисної складової α_I , яку вважаємо постійною на інтервалі спостереження, пропорційна лінійному прискоренню, що вимірюється. Параметри змінної складової $\alpha_{Cj}(t)$ руху ЧЕ необхідні у подальших процедурах алгоритмічної обробки для компенсації похибок оцінки стану і підвищення точності вимірювань лінійних прискорень.

Змінна складова $\alpha_{Cj}(t)$ визначається розв'язком нелінійного диференційного рівняння [2, 8]

$$\ddot{\alpha}_{3M} + 2\xi_{3M}\dot{\alpha}_{3M} + \omega_0^2 \sin \alpha_{3M} = 0, \quad (1)$$

де ω_0, ξ_{Cj} – колова частота і коефіцієнт згасання прецесійних коливань ЧЕ.

У разі малих коливань ЧЕ $\sin(\alpha_{Cj}) \approx \alpha_{Cj}$, а розв'язок рівняння (1) має вигляд [8]:

$\alpha_{3M}(t) = A_{3M} e^{-\xi_{3M}t} \sin(\omega_{3M}t + \phi_{3M})$, де $\omega_{3M} = \sqrt{\omega_0^2 - \xi_{3M}^2}$, A_{3M}, ϕ_{3M} – амплітуда і початкова фаза

прецесійних коливань ЧЕ. Якщо $\xi_{CI} \rightarrow 0$, то математична модель ідеальної траєкторії руху ЧЕ має вигляд:

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= \alpha_{II} + \alpha_{3M}(t); \quad \alpha_{II} = const; \\ \alpha_{3M}(t) &= \alpha_C \sin \omega_{3M}t + \alpha_S \cos \omega_{3M}t,\end{aligned}\quad (2)$$

де $\alpha_C = A_{3M} \cos \phi_{3M}$, $\alpha_S = A_{3M} \sin \phi_{3M}$. У цьому випадку вектор стану ЧЕ, який потрібно ідентифікувати, дорівнює: $Z_\alpha = (\alpha_{II}, \alpha_C, \alpha_S)^T$.

Оцінка виконується на основі обробки даних α_i^* , що надходять від датчика кутового положення (ДК) цього ЧЕ. При цьому

$$\alpha_i^* = \alpha(t_i) + \delta_\alpha(t_i); \quad i = \overline{1, K}; \quad t_i = i \cdot \delta_a; \quad T_c = K \cdot \delta_a,$$

де $\alpha(t_i)$ – значення, що відповідають ідеальній траєкторії руху ЧЕ, $\delta_\alpha(t_i)$ – похибки вимірної траєкторії руху ЧЕ, обумовлені дією завад на ЧЕ та похибками ДК, K – кількість відліків, що надходять від ДК та використовуються для оцінки стану ЧЕ, δ_a – інтервалу часу між відліками, T_c – час спостереження за ЧЕ.

Дослідимо похибки оцінки стану, зумовлені неадекватністю прийнятої моделі та реального сигналу ГГ, похибки внаслідок кінематичних нелінійностей та типових перешкод у законі руху ЧЕ, а також шумів ДК.

Враховуючи різні підходи до знайдення вихідної системи рівнянь, розглянемо два основних підходи, які використовуються для формування ФК.

Перший підхід полягає у використанні системи рівнянь гірографіметра (ГГ) в межах прецесійної теорії та врахування додаткового рівняння на підставі сталості кута неузгодженості стану стійкої $R^N = \alpha_I$, або стану нестійкої рівноваги $R^S = \alpha_I$ з нулем ДК. За цих умов систему рівнянь, яка характеризує спостережувані за ДК рух ЧЕ, можна записати у вигляді матричного рівняння

$$\dot{x}(t) = Ax(t), \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned}x &= [x_1, x_2, x_3]^T = [R^{N,S} \alpha \beta]^T, \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_g H^{-1} \\ 0 & \pm \omega_\xi & 0 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

У матриці A знак "–" перед елементом ω_ξ відповідає руху ЧЕ поблизу стану стійкої рівноваги, а знак "+" – поблизу стану нестійкої рівноваги.

Другий підхід при формуванні матриці A полягає у використанні диференціального рівняння другого порядку (1), яке характеризує рух ЧЕ за координатою α . За цих умов у системі (3) вектору стану має вигляд

$$x = [x_1, x_2, x_3]^T = [R^{N,S} \alpha \dot{\alpha}]^T,$$

а матриця

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \mp \omega_0^2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Повернемося до питання спостереження розглядуваної системи. Для цього вважатимемо, що поміж вектором вимірювань Z та вектором стану X є лінійний взаємозв'язок

$$z(t) = C \cdot x(t), \quad (5)$$

де C – матриця вимірювань.

Через те, що в системі ГГ потребує вимірювань сигнал $R^{N,S} + \alpha_{CI}$, то матриця C вироджується у матрицю-рядок

$$C = [1 \quad 1 \quad 0]. \quad (6)$$

Складемо матрицю спостереження системи.

Оскільки вимірювання Z здійснюються з похибками, то співвідношення (5) можна записати у вигляді

$$z(t) = C \cdot x(t) + V(t). \quad (7)$$

Тоді в прийнятих позначеннях модель ГГ має вигляд

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax(t); \\ z(t) &= Cx(t) + V(t).\end{aligned}\quad (8)$$

де $V(t)$ - вектор, складові якого - випадкові змінні і для них виконуються такі гіпотези:
 – математичне сподівання кожної складової дорівнює нулю;
 – похибки вимірювань у кожний момент часу не залежать від похибок вимірювань, які виконуються в наступний момент часу.

Враховуючи, що система ГГ (3) у розглядуваному випадку є стаціонарною, дискретний ФК представимо системою матричних рівнянь:

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + k_k(z_k - C\hat{x}_{k/k-1}); \tag{9}$$

$$k_k = P_{k/k-1}C^T[CP_{k/k-1} + L_k]^{-1}; \tag{10}$$

$$P_{k/k-1} = \hat{O}\hat{O}_{k-1/k-1}^T; \tag{11}$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - k_kCP_{k/k-1},$$

де $\hat{x}_{k/k-1}$ - оцінка x_k з врахуванням всієї інформації, яка відома в момент часу t_{k-1} та у попередні моменти часу; x_k - істинне значення x в момент часу t_k ; $\hat{x}_{k/k}$ - оцінка x_k з урахуванням всієї інформації, яка відома в момент часу t_k та у попередні моменти часу; $P_{k/k-1}$ - матриця коваріацій випадкової змінної $\hat{x}_{k/k-1} - x_k$.

$$P_{k/k-1} = E\{(\hat{x}_{k/k-1} - x_k)(\hat{x}_{k/k-1} - x_k)^T\}, \tag{12}$$

де $E\{\}$ - імовірнісна оцінка виразу в дужках; $P_{k/k-1}$ - матриця коваріацій випадкової змінної $\hat{x}_{k/k-1} - x_k$; L_k - матриця коваріацій випадкової змінної V_k

Перехідна матриця системи (3) не залежить від кроку обчислень, тому її можна представити у вигляді матричного ряду

$$\Phi = e^{A\Delta t} = 1 + A\Delta t + \frac{[A\Delta t]^2}{2!} + \frac{[A\Delta t]^3}{3!} + \dots \tag{13}$$

У разі надання матриці A у вигляді (4), матричний ряд перетворюється на матриці розмірності (3×3), в одній з яких елементи є розкладеннями тригонометричних функцій в степеневий ряд при орієнтації ЧЕ у стан стійкої рівноваги, іншій - елементи є розкладеннями гіперболічних функцій у степеневі ряди при орієнтації ЧЕ у стан нестійкої рівноваги. З урахуванням цих перетворень перехідні матриці для оцінки стану стійкої та нестійкої рівноваги набувають вигляду

$$\Phi^N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_0 \Delta t & \frac{1}{\omega} \sin \omega_0 \Delta t \\ 0 & -\omega \sin \omega_0 \Delta t & \cos \omega_0 \Delta t \end{bmatrix}, \tag{14}$$

$$\Phi^S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{ch} \omega_0 \Delta t & \frac{1}{\omega} \text{sh} \omega_0 \Delta t \\ 0 & \omega \text{sh} \omega_0 \Delta t & \text{ch} \omega_0 \Delta t \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Вектор стану системи в момент $t_1 = 0$ задається математичним сподіванням вектора $\hat{x}_{0/0}$ і встановлюється експериментально, на підставі вивчення властивостей системи задання початкових умов конкретного ГГ і з урахуванням точності початкової орієнтації ЧЕ відносно площини північ - південь.

$$\hat{x}_{0/0} = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_{10} \\ \Delta \hat{x}_{20} \\ \Delta \hat{x}_{30} \end{bmatrix}. \tag{16}$$

Для обчислення оцінки стану, яка використовується на першому кроці $\hat{x}_{k/k-1}$ при $k=1$, скористаємося співвідношенням

$$\hat{x}_{k/k-1} = \Phi \hat{x}_{k-1/k-1}.$$

Матрицю коваріацій початкового стану ГГ задамо у вигляді дисперсій початкових відхилень вектора стану (16), причому при $k=1$ матриця коваріацій має діагональний вигляд

$$P_{0/0} = \begin{bmatrix} (\Delta \hat{x}_{10})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\Delta \hat{x}_{20})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\Delta \hat{x}_{30})^2 \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Враховуючи структуру матриці вимірювань S , матриця коваріацій шуму вимірювача має вигляд

$$L_k = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Отже, використовуючи апріорну інформацію про перехідну матрицю, вектор початкового стану, матриці коваріацій стану системи та шумів вимірювача на першому кроці ($k=1$), ФК дає змогу рекурентно оцінити стан ПГ, крок за кроком уточнюючи елементи вектора $\hat{x}_{k/k}$.

Інший варіант розв'язку задачі ідентифікації на основі методу найменших квадратів має вигляд [2, 8]:

$$\hat{\alpha}_I = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{dI,j}; \quad \hat{\alpha}_C = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{dC,j}; \quad \hat{\alpha}_S = \sum_{i=1}^K \alpha_i^* l_{dS,j}.$$

У цьому випадку для визначення вектора стану чутливого елементу використовуються постійні коефіцієнти $l_{dI,j}$, $l_{dC,j}$, $l_{dS,j}$, $j = (n-k+1), n$. Ці коефіцієнти залежать від частоти коливань ЧЕ ω_0 , коефіцієнта згасання ξ_1 , частоти $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \xi_1^2}$, що використовується в алгоритмі ідентифікації, інтервалу часу δ_a між відліками, що надходять від ДК.

Всі перераховані величини можуть бути визначені з деякою похибкою та змінюватися на декілька відсотків під дією різних дестабілізуючих факторів у процесі експлуатації засобів вимірювань лінійних прискорень. Окрім того, кількість k відліків кута, що використовується для розрахунку вектора стану, також може бути обрана різною в залежності від потрібної швидкодії та просторової розподільчої здатності засобів вимірювань. Все це вимагає адаптації та оптимального настроювання параметрів в алгоритмах оцінювання для зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестационарними умовами вимірювань.

Адаптація та оптимальне настроювання параметрів алгоритму оцінки можуть бути виконані в процесі адаптації та навчання штучної нейронної мережі, на основі якої пропонується реалізовувати алгоритм оцінки. Вбудовані алгоритми і методи настроювання вагових коефіцієнтів мережі і є головною перевагою штучної нейронної мережі у порівнянні із звичайними неадаптивними засобами обробки вимірювальної інформації [11, 12].

Для оцінки вектора стану чутливого елементу будемо використовувати штучну нейронну мережу, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів (рис. 1). Навчання такої мережі та настроювання її вагових коефіцієнтів будемо виконувати на основі навчального правила Відроу-Хоффа, що є модифікацією методу найменших квадратів [11].

Ступінь наближення вихідного сигналу мережі $\hat{Z}_N = (\hat{\alpha}_I, \hat{\alpha}_C, \hat{\alpha}_S)^T$ до точного значення $Z_N = (\alpha_I, \alpha_C, \alpha_S)^T$ може бути оцінена функціоналом якості роботи мережі. Наприклад, для першого виходу мережі цей функціонал $J_{dI} = E[F(\Delta_{dI}(\alpha_I, \hat{\alpha}_I, \tilde{c}))] \rightarrow \min$, де $E[\cdot]$ – математичне сподівання функції втрат $F(\Delta_{dI}) = (\Delta_{dI})^2$ від похибки $\Delta_{dI} = \hat{\alpha}_I - \alpha_I$ мережі. Результатом навчання є оптимальний вектор коефіцієнтів $c^* = (l_{dI,n}^*, l_{dI,n-1}^*, \dots, l_{dI,n-k+1}^*)^T$, що мінімізує функціонал J_{dI} та враховує вплив дестабілізуючих факторів і нестационарних умов вимірювань. Значення $\tilde{c} = c^*$ може бути знайдено з рівняння $\nabla J_{dI}(\tilde{c}) = E[\nabla F(\Delta_{dI}(\tilde{c}))] = 0$.

Рекурентний алгоритм навчання штучної нейронної мережі:

$$\tilde{c}(q) = \tilde{c}(q-1) - \Gamma(q) \cdot \nabla F(\Delta_{dI}(\alpha_{iI}, \hat{\alpha}_I, \tilde{c}(q-1)), \tilde{c}(q-1)), \quad (19)$$

де $q = \overline{1, N_{i\hat{a}^*}}$ – номер кроку рекурентного алгоритму навчання з сигналом α_{iI} , $N_{i\hat{a}^*}$ – тривалість процедури навчання (загальна кількість кроків), $\Gamma(q)$ – матриця підсилення, що впливає на швидкість процедури навчання,

$$\frac{\partial F}{\partial l_{dI,n}} = \frac{\partial (\Delta_{dI}^2)}{\partial l_{dI,n}} = -2\alpha_{iI,r} \left(\alpha_{iI} - \sum_{j=n-k+1}^n \alpha_{iI,j} l_{dI,j} \right) = -2\alpha_{iI,r} (\alpha_{iI} - \hat{\alpha}_I). \quad (20)$$

Підставляючи (20) в (19), отримаємо:

$$\tilde{c}(q) = \tilde{c}(q-1) + \Gamma(q) \cdot 2\alpha_{iI,r} \cdot (\alpha_{iI} - \hat{\alpha}_I). \quad (21)$$

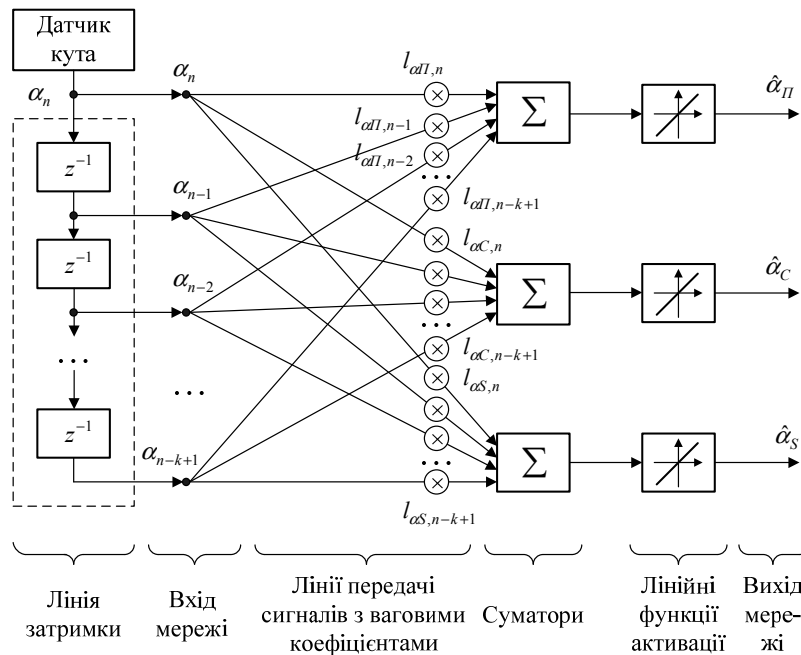


Рис. 1. Структурна схема оцінки вектора стану вимірювача лінійних прискорень на основі штучної нейронної мережі

На основі (21) отримаємо остаточний вираз для обчислення вагових коефіцієнтів нейронів у процесі навчання для кожного з виходів мережі:

$$\begin{aligned} \tilde{l}_{ad,j}(q) &= \tilde{l}_{ad,j}(q-1) + 2\alpha_{i,r} \cdot (\alpha_{i\tilde{l}} - \hat{\alpha}_i) \cdot \gamma_i / \|\alpha_i\|; \\ \tilde{l}_{ac,j}(q) &= \tilde{l}_{ac,j}(q-1) + 2\alpha_{i,r} \cdot (\alpha_{ic} - \hat{\alpha}_c) \cdot \gamma_i / \|\alpha_i\|; \\ \tilde{l}_{as,j}(q) &= \tilde{l}_{as,j}(q-1) + 2\alpha_{i,r} \cdot (\alpha_{is} - \hat{\alpha}_s) \cdot \gamma_i / \|\alpha_i\|, \end{aligned}$$

де $\|\alpha_i\| = \alpha_i^0 \cdot \alpha_i$ - евклідова норма вектору відліків навчального сигналу на вході мережі.

Ознакою завершення процедури навчання штучної нейронної мережі є виконання умов

$$\alpha_{i\tilde{l}} - \hat{\alpha}_{i\tilde{l}}(q) \leq \varepsilon_{ad}; \alpha_{ic} - \hat{\alpha}_{ic}(q) \leq \varepsilon_{ac}; \alpha_{is} - \hat{\alpha}_{is}(q) \leq \varepsilon_{as}, \quad (22)$$

де $\varepsilon_{ad}, \varepsilon_{ac}, \varepsilon_{as}$ - допустимі значення похибки оцінки стану вектора стану вимірювача лінійних прискорень (похибки виходу штучної нейронної мережі). Будемо вважати, що $\varepsilon_{ad} = \varepsilon_{ac} = \varepsilon_{as}$. Тоді для математичної моделі (2) середньоквадратичне значення похибки сигналу $\alpha(t)$, обумовлене похибками (22), дорівнює: $\sigma_\alpha = \varepsilon_{ad} / \sqrt{3} \leq \sigma_{\tilde{A}\tilde{E}} / 3$, де $\sigma_{\tilde{A}\tilde{E}}$ - середньоквадратичне значення похибки ДК. Звідси

$$\alpha_{i\tilde{l}} - \hat{\alpha}_{i\tilde{l}}(q) \leq \sigma_{\tilde{A}\tilde{E}} / \sqrt{3}; \alpha_{ic} - \hat{\alpha}_{ic}(q) \leq \sigma_{\tilde{A}\tilde{E}} / \sqrt{3}; \alpha_{is} - \hat{\alpha}_{is}(q) \leq \sigma_{\tilde{A}\tilde{E}} / \sqrt{3}.$$

Ці співвідношення визначають завершення процедури навчання штучної нейронної мережі та гарантують теоретично обчислену точність оцінок вектора стану вимірювачів лінійних прискорень у несприятливих та нестаціонарних умовах вимірювань.

Висновки. Ефективним шляхом підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень, як важливої складової частини гравіметричних і навігаційних систем [1, 2], є ідентифікація стану ЧЕ цих вимірювачів на основі алгоритмічних методів. Отримано розв'язок задачі ідентифікації на основі фільтра Калмана у реальному часі. Це дозволяє оцінити вектор стану ЧЕ за наявності завад детермінованого та випадкового характеру

Також пропонується реалізація алгоритму ідентифікації на основі штучної нейронної мережі. Адаптація та оптимальне настроювання параметрів алгоритму можуть бути виконані у процесі адаптації та навчання цієї мережі. Для оцінки вектора стану ЧЕ розроблено схему, що складається з ліній затримки та трьох адаптивних лінійних нейронів. Результатом є зменшення додаткової похибки вимірювань, обумовленої складними та нестаціонарними умовами вимірювань.

Література

1. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. – М. : Физматлит, 2003. – 280 с.
2. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри : підручник / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.

3. Bezvesilna O. Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter / Bezvesilna O., Tkachuk A., Chepyuk L., Nechai S., Khylichenko T. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2017, v.1 (7-85), p. 45-56
4. Bezvesilna O. Gravimeters of aviation gravimetric system: Classification, comparative analysis, prospects / Bezvesilna O., Kamiński M. // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017, v. 550, p. 496-504.
5. Яцук В. О. Методи підвищення точності вимірювань : підручник / В. О. Яцук, П. С. Малахівський. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 368 с.
6. Cherepanska I. Artificial neural network as a basic element of the automated goniometric system / Cherepanska I., Bezvesilna E., Sazonov A. // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017 v. 543, p. 43-51.
7. Синицын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева : учебное пособие / И. Н. Синицын. – М. : Университетская книга ; Логос, 2006. – 640 с.
8. Безвесільна О. М. Вимірювання прискорень : підручник / О. М. Безвесільна. – К. : Либідь, 2001. – 264 с.
9. Bezvesilnaya E.N. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / E.N. Bezvesilnaya, A.H. Tkachuk // Aviation (Vilnius, Lithuania). – 2014. – v. 18(3). – p. 134-140.
10. Фалькович С. Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с.
11. Черепанська І.Ю. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач технологічної підготовки гнучкого виробництва : монографія з грифом / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського 2018. – 92 с.
12. Зайченко Ю. П. Основи проектування інтелектуальних систем : навчальний посібник / Ю. П. Зайченко. – К. : Видавничий дім “Слово”, 2004. – 352 с.

References

1. Upravlenye y navedenye bespylotnykh manevrennykh letatelnykh apparatov na osnove sovremennykh ynformatsyonnykh tekhnolohiy / pod red. M. N. Krasylshchykova, H. H. Sebrakova. – М. : Fyzmatlyt, 2003. – 280 s.
2. Bezvesilna O. M. Aviatsiini hravimetrychni systemy ta hravimetry : pidruchnyk / O. M. Bezvesilna. – Zhytomyr : ZhDTU, 2007. – 604 s.
3. Bezvesilna O. Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter / Bezvesilna O., Tkachuk A., Chepyuk L., Nechai S., Khylichenko T. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2017, v.1 (7-85), p. 45-56
4. Bezvesilna O. Gravimeters of aviation gravimetric system: Classification, comparative analysis, prospects / Bezvesilna O., Kamiński M. // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017, v. 550, p. 496-504.
5. Yatsuk V. O. Metody pidvyshchennia tochnosti vymiriuvan : pidruchnyk / V. O. Yatsuk, P. S. Malachivskiy. – Lviv : Beskyd Bit, 2008. – 368 s.
6. Cherepanska I. Artificial neural network as a basic element of the automated goniometric system / Cherepanska I., Bezvesilna E., Sazonov A. // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017 v. 543, p. 43-51.
7. Synytsyn Y. N. Fyltry Kalmana y Puhacheva : uchebnoe posobyе / Y. N. Synytsyn. – М. : Unyversytetskaia knyha ; Lohos, 2006. – 640 s.
8. Bezvesilna O. M. Vymiriuvannia pryskoren : pidruchnyk / O. M. Bezvesilna. – К. : Lybid, 2001. – 264 s.
9. Bezvesilnaya E.N. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter / E.N. Bezvesilnaya, A.H. Tkachuk // Aviation (Vilnius, Lithuania). – 2014. – v. 18(3). – p. 134-140.
10. Falkovych S. E. Statystycheskaia teoriya yzmyertylnykh radyosystem / S. E. Falkovych, E. N. Khomiakov. – М. : Radyo y sviaz, 1981. – 288 s.
11. Cherepanska I.Iu. Shtuchni neironni merezhi pry vyrishenni zadach tekhnolohichnoi pidhotovky hnuchkoho vyrobnytstva : monohrafiia z hryfom / I.Iu. Cherepanska, O.M. Bezvesilna, A.Iu. Sazonov. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho 2018. – 92 s.
12. Zaichenko Yu. P. Osnovy proektuvannia intelektualnykh system : navchalnyi posibnyk / Yu. P. Zaichenko. – К. : Vydavnychiy dim “Slovo”, 2004. – 352 s.

Рецензія/Peer review : 14.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 18.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Тимчик Г.С.

**ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (АЧХ) И
КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (КЛП)
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (ПЭЭ)**

Работа посвящена измерению линейных смещений в нанодиапазоне, анализу особенностей такого рода работ, обеспечению единства измерений и стабильности измеряемой физической величины, достоверности результатов и их привязки к Государственному эталону единицы длины – метру и к Государственному эталону угла фазового сдвига (УФС) – градусу фазы. Рассмотрены критерии, которым должны соответствовать методы и средства, прецизионных измерений нанодиапазона, а также методы и средства съема и представления обработки получаемой информации. Сделан анализ основных источников погрешностей. Рассмотрены особенности построения измерительных комплексов, а также вопросы калибровки фазовых измерений в оптике. Рассмотрены вопросы прикладного характера: измерение реальных перемещений объектов в нанодиапазоне, определения их скорости и ускорения, а также вопросы внедрения разработанных методов в область практического применения. Приведены результаты экспериментальных и прикладных задач с использованием метода и средств численного гетеродинирования, приведены формулы расчета измерения скорости смещения и ускорения и даны рекомендации по обеспечению экологического баланса с окружающей средой. Также в предлагаемой работе приведены источники проявления акустоэмиссионного явления, их роль и значимость в тех или иных производственных циклах. Расставлены приоритеты их применения в различных областях науки и техники. Рассмотрены вопросы практического использования явления акустоэмиссионного эффекта в различных контрольно-измерительных комплексах для определения дефектов, их размеров и мощности в различных технологических циклах: прокачка нефте- и газопроводов, магистральных водопроводах, особо нагруженных узлов железнодорожного транспорта и других техногенно-опасных объектов.

Ключевые слова: нанометрия-фазометрия, лазер, угол фазового сдвига (УФС), наносмещение, гетеродин, интерферометрия-фазометрия, нанометрология.

A.V. VASILEVA, S.A. DARZNEK, ZH.E. ZHELKOBAYEV, R.H. TSARBAEV
JSC “NICPV”, Moscow

**MEASUREMENT OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS (AFC) OF ACOUSTIC EMISSION
TRANSFORMERS (AET) AND THEIR COEFFICIENTS OF LINEAR TRANSFORMATION**

The work is devoted to measurement of linear displacements in the nanoscale, analysis of features of this kind of work, ensuring the uniformity of measurements and stability of the measured physical quantity, reliability of results and their binding to the State standard of unit length - meter and to the state standard of the phase shift angle (UFS) - phase degree. The criteria that should be met by methods and tools, precision measurements of the nanoscale, as well as methods and means for the removal and presentation of the processing of the information received. The analysis of the main sources of errors is made. The features of the construction of measuring systems, as well as the issues of calibration of phase measurements in optics, are considered. Questions of an applied nature are considered: measurement of real displacements of objects in the nano-range, determination of their speed and acceleration, and also questions of introduction of the developed methods in the field of practical application. The results of experimental and applied problems using the method and means of numerical heterodyning are given, formulas for calculating the measurement of the displacement and acceleration velocity are given and recommendations are given for ensuring an ecological balance with the environment. Also in the proposed work are the sources of the manifestation of the acoustic emission phenomenon, their role and significance in these or those production cycles. The priorities of their application in various fields of science and technology are set out. The problems of practical use of the acoustic emission effect phenomenon in various test and measurement systems for determining defects, their sizes and power in various technological cycles are considered: pumping of oil and gas pipelines, main water pipelines, especially loaded railway transport junctions and some techno genic dangerous objects.

Key words: nanometry-phaseometry, laser, phase-shift angle (UFS), nanoscaling, heterodyne, interferometry-phaseometry, nanometrology.

1. Введение

В данной работе рассмотрены принципы построения фазоизмерительных комплексов нанодиапазона, а также вопросы калибровки фазовых измерений и проанализированы источники погрешностей.

С учетом большого класса шумов, используя лазерные интерферометры, можно измерять фазовые сдвиги на уровне $\sim 10(-3)$ градуса фазы на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм, что эквивалентно линейному смещению $\sim 0,01$ нм [1].

Измерители наноперемещений, созданные к настоящему моменту, максимально учитывают перечисленные выше требования, обеспечивая необходимое разрешение, быстродействие, минимальную погрешность, а также непосредственную привязку: к Государственному эталону единицы длины – метру и к Государственному эталону угла фазового сдвига (УФС) – градусу фазы.

Рассмотрены вопросы прикладного характера: измерение реальных перемещений объектов в нанодиапазоне, определения их скорости и ускорения, а также вопросы внедрения разработанных методов в область практического применения.

Приведены результаты, достигнутые с использованием рассмотренных методов нанометрии в

экспериментальных и прикладных задачах и реальные погрешности сопутствующие этим измерениям.

2. Схема измерений фазовых сдвигов

Принципиальная схема фазоизмерительной системы приведена на рис. 1.

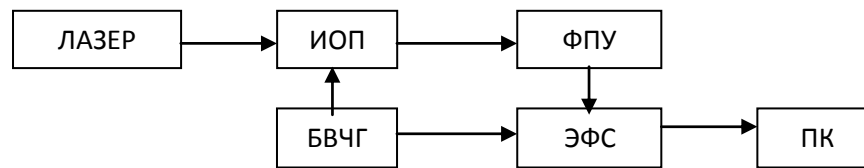


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы, где ЛАЗЕР - источник высокостабилизированного оптического излучения; ИОП - интерференционный оптический преобразователь со встроенными акустооптическими модуляторами; ФПУ - фотоприемное устройство; БВЧГ - блок высокочастотных генераторов со встроенным электрическим смесителем; ЭФС - электронно-фазоизмерительная система; ПК - персональный компьютер

Для методов с переносом спектра пределы асимметричны и равны $\Delta\varphi_{Ton} < 2\pi$ для отрицательного значения f_g . Алгоритмические методы, восстанавливающие ФЦ по алгоритму $|\varphi_i - \varphi_{i-1}| = 180^\circ$ имеют предел $\Delta\varphi_{Ton} = \Delta\varphi_{Tизм} \leq 180^\circ$, где $\Delta\varphi_{Tизм}$ — приращение УФС за время измерения $T_{изм}$.

Максимальный доплеровский сдвиг частоты, обусловленный перемещением объекта, определяется как

$$f_D = 2V_{max} / \lambda, \quad (1)$$

где f_D — доплеровский сдвиг частоты, вызванный перемещением объекта, V_{max} — скорость смещения объекта, λ — длина волны излучения используемого лазера.

Отличительной особенностью данного типа лазерного фазометра является простота оптической схемы, относительная легкость юстировки, малые габариты, быстродействие, помехозащищенность и высокая надежность, обусловленные фазовыми методами обработки информационного сигнала.

Необходимо особо отметить то обстоятельство, что в данной схеме АОМ-ы выполняют дополнительную роль управляемых делителей входного оптического излучения, обеспечивая, таким образом, управляемость контрастностью поля интерференции.

Базовый программный продукт, обеспечивает сбор, обработку и хранение информации, выдачу её потребителю на бумажных и электронных носителях. Информация выдаётся в виде редактируемых файлов: «перемещение», «скорость», «ускорение», «амплитуда смещения», «фурье-спектр».

Представленные результаты, получены с использованием гетеродинного метода измерений смещений в нанодиапазоне. В частности, измерение колебательного смещения свободного конца пьезостолбика при подаче на него модулирующего сигнала различной частоты и формы (рис. 2), амплитудно-частотной характеристики преобразователя акустической комиссии систем неразрушающего контроля (рис. 3, 4).

3. Контроль параметров движения

3.1. Измерение смещения, скорости и ускорения в нанодиапазоне

Работам, ведущимся в области нанотехнологий необходима высокая точность и достоверность получаемых результатов, т.е. нужно соответствующее метрологическое обеспечение приборов и средств используемых при измерении линейных размеров, перемещений, скорости и ускорений нанообъектов. Эти высокоточные системы и приборы нуждаются в особых методах и средствах поверки/калибровки.

Для измерения линейных перемещений в нанодиапазоне наиболее перспективными являются неразрушающие оптические методы лазерной интерферометрии-фазометрии, обеспечивающие высокую чувствительность $\sim 10^{-12}$ м к смещению объекта, высокую локальность, абсолютный характер калибровки измерительных данных в долях длины волны лазерного излучения и возможность автоматизации обработки измерительных данных. Необходимо отметить, что в целом область применимости методов лазерной интерферометрии-нанометрии сверху ограничена длиной когерентности излучения частотно-стабилизированных лазеров ($\geq 10^2$ м), а снизу порогом чувствительности приемников излучения $\sim 10^{-10}$ м.

Внутри этих границ требования, предъявляемые к лазерно-интерферометрическим измерителям линейных перемещений, существенно разнятся от того, для работы в какой части этого диапазона они предназначены.

Как отмечалось выше, в основу работы лазерной измерительной системы (ЛИС) положено сравнение измеряемого изменения длины оптического пути с высокостабильной мерой — длиной волны излучения стабилизированного гелий-неонового лазера. Сравнение осуществляется при помощи двулучевого лазерного гетеродинного интерферометра, в котором производится разделение лазерного излучения на опорный и измерительный пучки, идущие с разными частотами, и последующее совмещение излучения на смесительном элементе. Преобразование частоты излучения стабилизированного одночастотного гелий-неонового лазера осуществляется с использованием акустооптических модуляторов (АОМ).

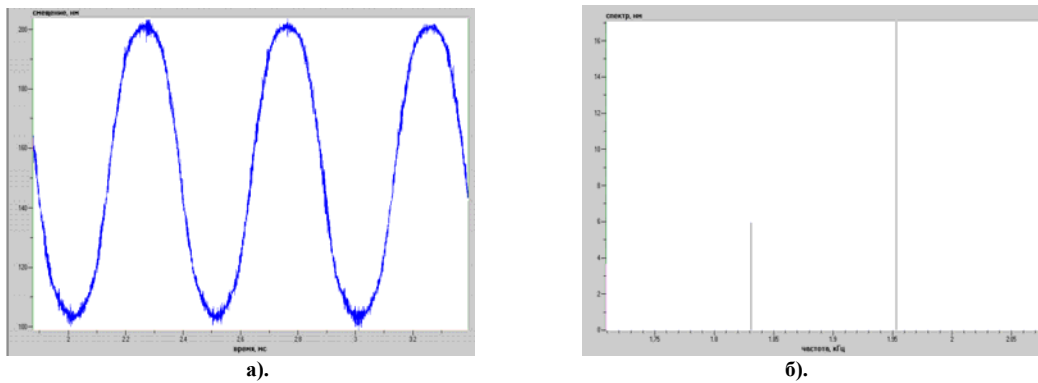


Рис. 2. График смещения (а) свободного конца пьезостолбика колебания при подаче на него гармонического колебания и его спектральное представление (б)

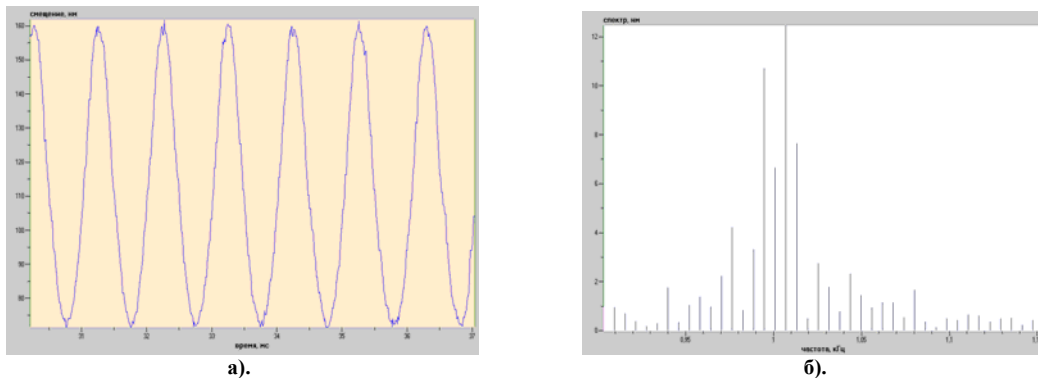


Рис. 3. График смещения (а) свободного конца пьезостолбика при подаче синусоидального колебания и его спектральное представление (б), $f \approx 1$ кГц; $U = 6V(p/p)$

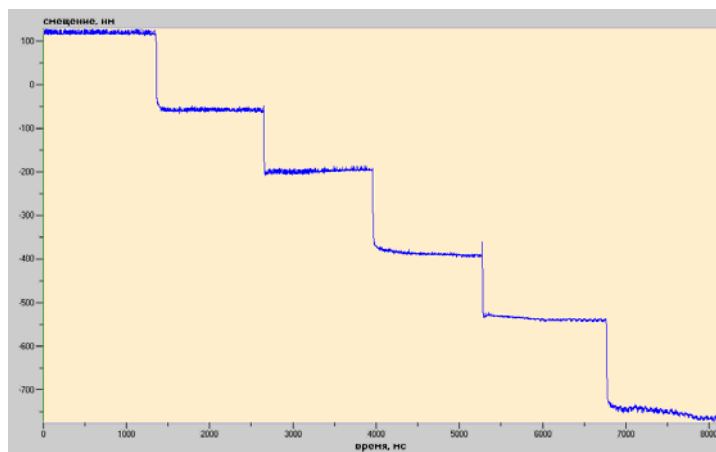


Рис. 4. График смещения свободного конца пьезостолбика при подаче напряжения шагом 10В в диапазоне «0-50В»

Известно [4–8], что при распространении ультразвуковых волн в конденсированных средах образуется высокочастотная пространственная фазовая решетка, при попадании на эту решетку свет испытывает дифракцию. При некоторых условиях (называемых условиями Брэгга) от падающего света выделяется единственный дифрагированный пучок излучения. Величина углового отклонения пучка определяется из соотношения.

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad , \quad (2)$$

где λ – длина волны падающего излучения, Λ — длина акустической волны, θ_B – угол Брэгга.

На рисунке $5\Omega_1$ и K_1 – частота и волновой вектор ультразвуковой волны, проходящей через первый АОМ, а Ω_2 и K_2 – частота и волновой вектор ультразвуковой волны, проходящей через второй АОМ. Векторы k_{+1} и k_{-1} волновые векторы волн, испытывающих брэгговскую дифракцию на двух модуляторах.

В измерительной установке реализован вариант, схематически представленный на рисунке 5, с использованием двух АОМ. Оптический пучок, с частотой ω_0 (нулевой пучок), проходя через первый модулятор под углом Брэгга, дифрагирует на бегущей с частотой Ω_1 дифракционной решетке, разделяясь на два пучка с частотами ω_0 и $\omega_0 + \Omega_1$ (плюс первый пучок). Далее нулевой пучок проходит через второй модулятор с частотой Ω_2 под углом Брэгга и разделяется опять на два пучка с частотами ω_0 и $\omega_0 - \Omega_2$ (минус

первый пучок). Таким образом, на выходе АОМ мы получаем три пучка: нулевой, плюс первый и минус первый. Один из полученных пучков (например, плюс первый), падая на образец и отражаясь, получает информацию о перемещениях объекта в виде набега угла фазового сдвига $\Delta\varphi$ (информационный пучок); другой пучок проходит свой оптический путь, не соприкасаясь с образцом (опорный пучок). Нулевой пучок поглощается дополнительным устройством. Далее информационный и опорный пучки интерферируют, падая на фотоприемное устройство (ФПУ). Последующее выделение информационного сигнала происходит на разностной частоте $|\Omega_1 - \Omega_2|$ в ФПУ. Обработка полученной информации производится в специализированной электронно-фазометрической системе (ЭФС). ЭФС подключен к персональному компьютеру. Программное обеспечение позволяет в режиме диалога осуществлять сбор измерительных данных, их обработку и представление в виде, удобном для пользования.

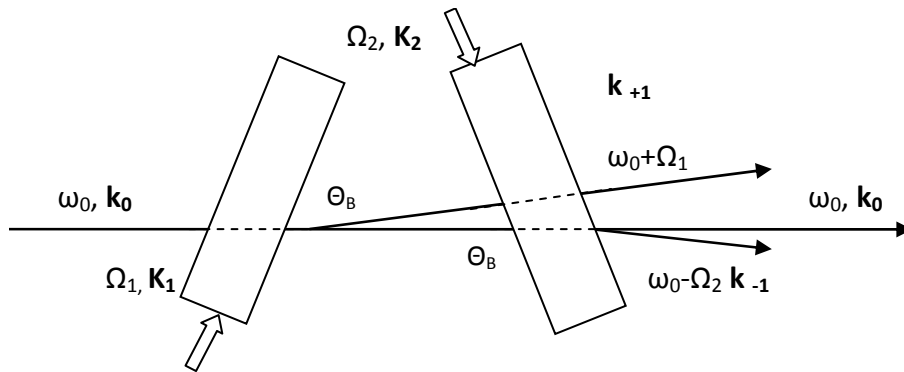


Рис. 5. Схема дифракции Брэгга при распространении лазерного излучения (с частотой ω_0 и волновым вектором k_0) через два акустооптических модулятора (АОМ)

Система ЛИС включает в себя:

- стабилизированный гелий-неоновый лазер;
- интерференционный оптический преобразователь с включением двух акустооптических модуляторов (АОМ);
- фотоприёмное устройство (ФПУ);
- электронно-фазометрическую систему (ЭФС);
- блок высокочастотных генераторов (ВЧГБ);
- интерфейс связи;
- персональный компьютер;
- программное обеспечение.

ЛИС обеспечивает работу в режиме измерений перемещений ΔX в реальном масштабе времени путем счета фазовых циклов (ФЦ) и добавленного к ним так называемого угла фазового сдвига (УФС) $\Delta\varphi$:

$$\Delta X = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \cdot \frac{\lambda}{2n} \quad (3)$$

где N – фазовые циклы ($N=0,1,2,3,\dots,N$),
 $\Delta\varphi$ – угол фазового сдвига, n –
 показатель преломления среды

Оптическая система ЛИС представляет собой двулучевой модифицированный интерферометр Майкельсона. Функциональная схема ЛИС представлена на рисунке 6.

ЛИС обладает диапазоном измерений линейных перемещений 10^{-9} – 10^{-2} м, с дискретностью отсчёта 0.1 нм и быстродействием обусловленной выбранной разностной частотой. Диапазон абсолютной погрешности измерений, в зависимости от диапазона, укладывается в промежуток от 0.5 до 3 нм. Такие технические характеристики дают возможность решать широкий спектр задач.

Диапазон линейных измерений, при небольших значениях

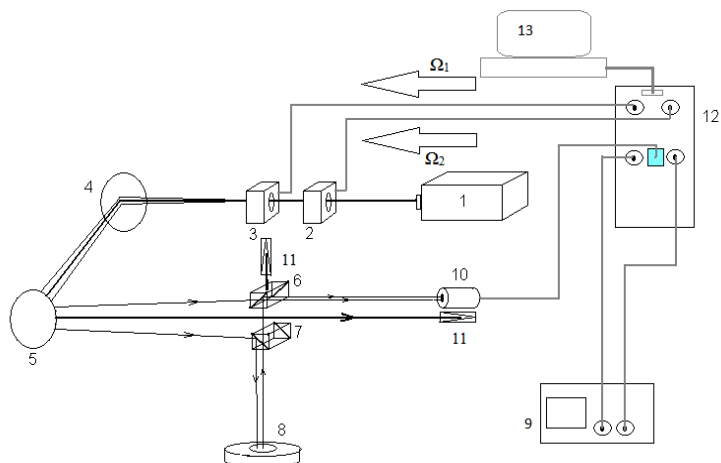


Рис. 6. Структурно-функциональная схема ЛИС-01М
 1 – лазер ЛГН 302; 2, 3 – АОМ; 4, 5 – зеркала; 6, 7 – светоделительные элементы; 8 – образец с нанесённым отражающим покрытием; 9 – осциллограф; 10 – фотоприёмник; 11 – поглотитель нерабочего пучка; 12 – ЭФС; 13 – ПК и/или ноутбук

падающей на приемник оптической мощности ограничен шумами фотоприёмного устройства. Однако фазовые измерения ограничены не только шумами фотоприёмника, но также и флуктуациями самой фазы. Нестабильность фазы имеет с одной стороны, квантовую природу, а с другой стороны она может быть обусловлена флуктуациями оптической длины пути. Флуктуации оптического пути, в свою очередь, вызваны самими разнообразными причинами: температурными вариациями длин плеч интерферометра и показателей преломления оптических элементов, механическими, акустическими и микросейсмическими колебаниями. Данные виды колебаний ограничивают чувствительность и точность фазовых измерений. Эти значения можно улучшить сужением полосы приема, т.е. увеличением времени измерений.

Однако при достаточно больших временах измерения вариаций фазового сдвига существенное значение имеет его стабильность. Температурные изменения, механическая текучесть, старение образцов, изменение состояния окружающей среды приводят к изменению длины оптического пути, т.е. к дрейфу фазового сдвига.

Можно показать, что с учетом большого класса шумов, используя лазерные интерферометры, можно измерять фазовые сдвиги $\sim 10^{-2}$ градуса фазы на длине волны $\lambda=0.6328$ мкм, что эквивалентно линейному смещению ~ 0.1 нм.

Как указывалось выше, верхний предел измерений ограничен длиной когерентности излучения лазера, а нижний шумами фотодиода и, конечно, особенностями конструкторской реализации всего комплекса.

Установка позволяет проводить измерение амплитудно-частотных характеристик различных объектов. Рассмотрим исследование актюатора, у которого один конец закреплен, а другой является свободным. Актюатор используется для преобразования электрического напряжения в перемещение, пропорциональное приложенному сигналу. На исследуемый образец подается напряжение, от генератора переменных сигналов, с частотой «f». Измерительная система позволяет изучать характеристики объекта при различных видах воздействия: импульсного характера, пилообразного и гармонического вида.

Ещё одним примером типовых измерений является статические измерения перемещения образца. В данном случае, на образец подаётся постоянное напряжение через заданные промежутки времени, данный тип измерений позволяет изучить такие характеристики актюатора, как гистерезис и крип, а также узнать зависимость смещения образца в зависимости от прикладываемого напряжения рисунках 7, 8, 9.

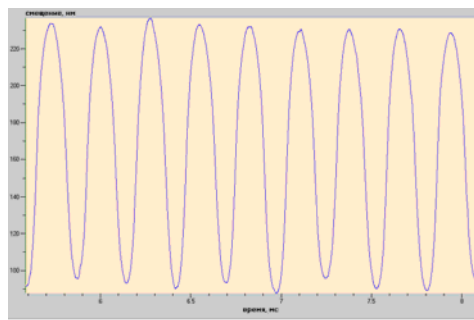
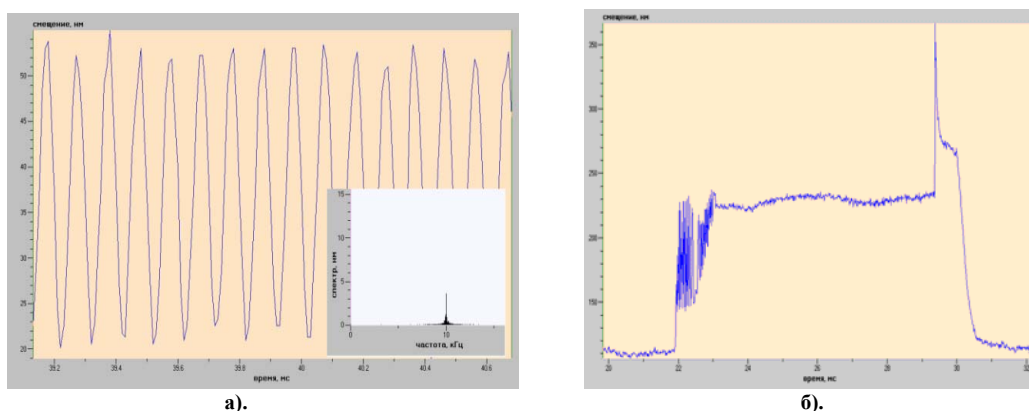


Рис. 7. АЧХ актюатора типа АПМ

На рисунках 8 (а,б) и 9 (а,б) представлены результаты исследований фазосдвигающих устройств (ФСУ), изготовленных из пьезокерамических структур.



а).
 б).
 Рис. 8. Отклик ФСУ-1: а) на сигнал с $f=10$ кГц и спектр отклика; б) на импульсное напряжение в 20В

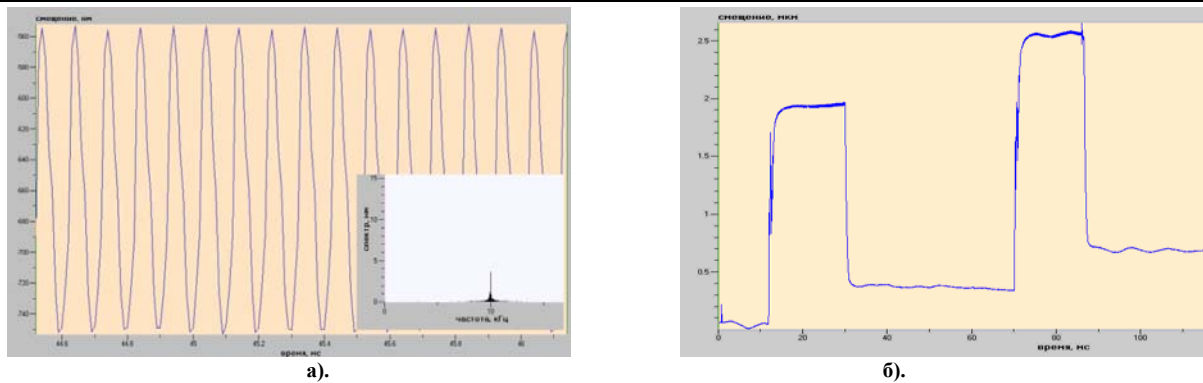


Рис. 9. Отклик ФСУ-2: а) на сигнал с $f=10\text{кГц}$ и спектр отклика; б) на импульсное напряжение в 50В. Погрешность измерений лежит в диапазоне (6-8)%

Глубокая программная обработка позволяет получать такие параметры, как скорость и ускорение движения объекта.

Развитие наноиндустрии невозможно без точных и надёжных диагностических инструментов. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) является одной из немногих методик, позволяющих исследовать наноразмерные структуры и визуализировать поверхность материалов с атомарным разрешением. При этом СЗМ позволяет проводить измерения целого ряда пространственно распределённых параметров, таких как модуль упругости, твёрдость, электропроводность, а также получать топографические изображения формы поверхности и её свойств. Основным источником погрешности в СЗМ является неточность определения положения объекта во время сканирования. Емкостные датчики, традиционно применяемые в СЗМ, измеряют, перемещение опосредовано. Оценить или как-то учесть вносимую ими погрешность практически невозможно. В отличие от них, измерения, осуществляемые лазерным интерферометром, как прибором, проводящим сравнение величины перемещения объекта с длиной волны лазерного излучения, носят первичный характер. Поэтому лазерная интерферометрия в настоящее время становится основным метрологическим обеспечением средств измерений в нанометровом диапазоне перемещений [1].

На данный момент, на базе уже существующих измерителей создан прототип 3D-измеритель наноперемещений, в основу которого положены принципы работы гетеродинного интерферометра. Она совмещалась с атомно-силовым микроскопом (АСМ) и позволяла не только производить более точные измерения наноразмерных образцов, но и калибровать сами АСМ, привязывая их к Государственному первичному эталону единицы длины – метру, и к Государственному эталону угла фазового сдвига – градусу фазы.

Представленная измерительная система «интерферометр-фазометр» позволяет исследовать в реальном режиме времени, сложные по составу пьезокерамические структуры, используемые в различных устройствах в качестве актюаторов.

3.2 Вычисление перемещений, скорости и ускорений

Для расчета смещения подвижного зеркала $s(t)$ в лазерном интерферометрическом измерителе перемещений [5, 6] использована методика численного гетеродинирования сигнала фотоприемника. Оцифрованный сигнал фотоприемника умножался на систему базовых гармоник $\cos \Omega t$ и $\sin \Omega t$ несущей частоты Ω , а затем из произведения методом численной фильтрации удаляется высокочастотная компонента. Полученные низкочастотные составляющие использовались для восстановления искомого зависимости смещения зеркала $S(t)$. Для численной фильтрации использовался фильтр Баттерворта в частотном домене.

Такая методика позволяет рассчитывать смещение зеркала с шагом по времени, значительно меньшим, чем в методе временных интервалов [5]. Приведены результаты обработки экспериментальных данных по измерению временной зависимости колебаний зеркала интерферометра с амплитудой порядка десятков нанометров на частотах в диапазоне кГц.

Принципиальная схема лазерного гетеродинного интерферометра представлена на рисункеб. В интерферометрах такого типа луч света от He-Ne лазера 1 сначала проходит через блок из двух оптико-акустических дефлекторов 2 и 3. Дифрагируя на ультразвуковой волне дефлектора, свет отклоняется от оптической оси системы и приобретает дополнительный сдвиг частоты, равный частоте ультразвуковой волны. В результате луч лазера расщепляется на два пучка, распространяющихся под углом друг к другу. Разность частот между ними равна разности частот акустических волн в дефлекторах F и лежат в диапазоне 10–1000 кГц.

Один из этих лучей — опорный — после отражения от поворотного зеркала 4 поступает на фотоприемник 9, а второй — сигнальный — сначала направляется на подвижное зеркало интерферометра 7. Подвижное зеркало закрепляется на торце пьезоэлектрического элемента, которое исполняло роль вибратора. При подаче переменного напряжения на пьезоэлемент его длина периодически изменяется, и зеркало интерферометра совершает колебания, форма которых близка к синусоидальной. (См. рисунок 1)

В результате интерференции опорного и сигнального лучей на фотоприемнике возникает частотно модулированный сигнал

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Phi(t), \quad (4)$$

где I_1 и I_2 — интенсивности лучей, $\Phi(t) = \Omega t + \varphi(t)$, $\Omega = 2\pi F$ — разностная акустическая частота, а $\varphi(t)$ — разность фаз опорного и сигнального лучей, связанная со смещением подвижного зеркала $s(t)$ формулой

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda_{\text{в}}} s(t), \quad (5)$$

где $\lambda_{\text{в}}$ — длина волны света в воздухе.

В качестве устройства сбора данных в наших экспериментах использовался быстродействующий запоминающий осциллограф Tektronix TDS2014B, который с заданным шагом по времени оцифровывал сигнал фотоприемника и записывал его в виде файла. Полученный файл загружался в специально разработанную программу, которая рассчитывала искомую временную зависимость смещения зеркала $s(t)$ по известному сигналу фотоприемника $I(t)$ в соответствии с разработанной методикой.

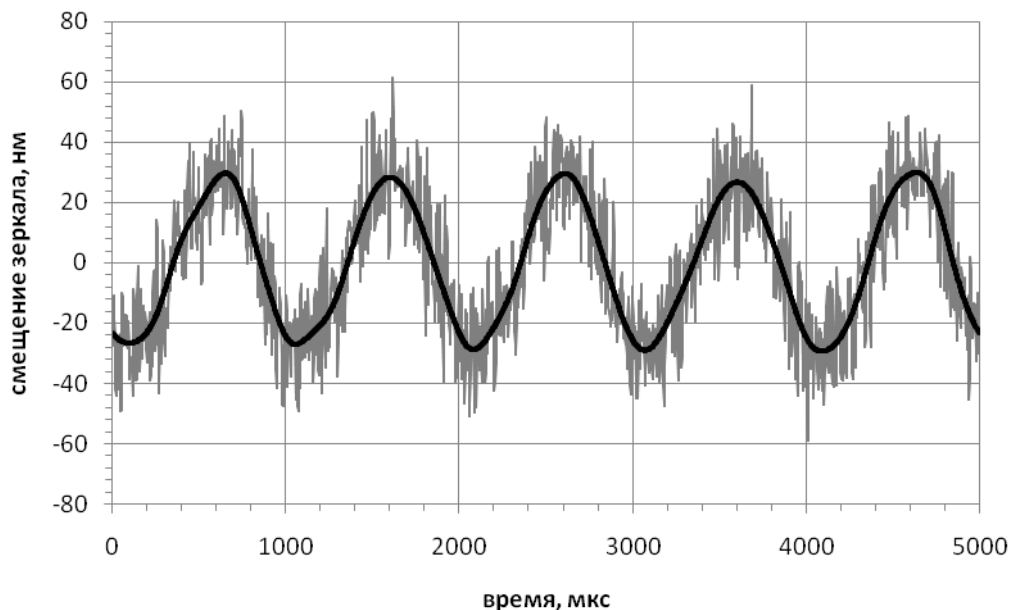


Рис. 10. Расчётная зависимость смещения подвижного зеркала от времени для различных параметров фильтра Баттерворта. Серая тонкая кривая соответствует «мягкому» фильтру с частотой среза $f_c = 99,5$ кГц, а жирная пунктирная — «жесткому» с $f_c = 3,9$ кГц

4. Калибровка /поверка преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ)

4.1 Преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ)

Создание лазерного гетеродинного интерферометра с двойным преобразованием входного лазерного излучения в широком диапазоне частот, дает возможность проводить поверку/калибровку преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ).

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля значительное место занимают акустические методы [7, 8], к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии (АЭ). В акустических методах в качестве первичных преобразователей в большинстве случаев используются акустоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании механического (акустического) смещения поверхности в электрический сигнал. Это так называемые преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ).

4.2 Неразрушающая техническая диагностика (ТД)состояния промышленного оборудования

На современном этапе развития промышленности вопросы обеспечения надежной работы комплектующих изделий, оборудования и энергоснабжения приобретают первостепенное значение. Особое внимание к проблеме обеспечения промышленной безопасности объясняется тем, что современные производственные объекты работают в условиях повышенной нагрузки; возрастают параметры рабочих сред (давление, температура, химическая и радиационная активность); повышаются мощность и производительность отдельных блоков. Отказы в работе изделий, оборудования, коммуникаций, трубопроводов ведут к значительным экономическим потерям, в том числе обусловленными и нарушениями экологического баланса. Все это определяет необходимость системного подхода к оценке надежности работы производственных объектов, когда на первое место выдвигаются методы технической диагностики и неразрушающего контроля.

4.3 Физические основы метода неразрушающего контроля

Пластическая деформация твердых сред, развитие дефектов, трения, прохождение жидких и газообразных сред через узкие отверстия, неизбежно порождают волны, регистрируя которые, можно судить о протекании процессов и их параметрах [9].

4.3.1 Виды акустической эмиссии

«1. Акустическая эмиссия материала – акустическая эмиссия, вызванная локальной динамической перестройкой структуры материала;

2. Акустическая эмиссия утечки – акустическая эмиссия, вызванная гидродинамическими и/или аэродинамическими явлениями при протекании жидкости (газа) через сквозную несплошность объекта испытаний;

3. Акустическая эмиссия трения – акустическая эмиссия, вызванная трением поверхностей твердых тел;

4. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях – акустическая эмиссия, связанная с фазовыми превращениями в веществах и материалах;

5. Магнитная акустическая эмиссия – акустическая эмиссия, связанная с излучением звуковых волн при перемагничивании материалов;

6. Акустическая эмиссия радиационного взаимодействия – акустическая эмиссия, возникающая в результате нелинейного взаимодействия излучения с веществами и материалами;

7. Акустическая эмиссия при химических и электрохимических реакциях – акустическая эмиссия, возникающая в результате протекания химических и электрохимических реакций, включая разнообразные коррозионные процессы».

ПРИМЕЧАНИЕ: Из перечисленных видов АЭ наибольшее применение для контроля промышленных объектов нашли первые три.

4.4 Акустоэмиссионный метод неразрушающего контроля

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля (НК) значительное место занимают акустические методы, к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии (АЭ).

В акустических методах в качестве первичных преобразователей в большинстве случаев используются акустоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании механического (акустического) смещения поверхности в электрический сигнал.

Метод АЭ успешно применяется для диагностирования технического состояния промышленных объектов: больших емкостей, металлических строительных конструкций, трубопроводов, мостов, различных узлов и устройств железнодорожного транспорта и т.д. Основным макроисточником такой эмиссии в твердом теле выступают фазовые превращения, образование и рост дефектов. Микромеханизмом АЭ является динамический разрыв атомных связей.

Метод АЭ – один из наиболее мощных средств контроля за безаварийной работой оборудования опасных производственных объектов. Основное достоинство метода – возможность с его помощью выявлять и классифицировать развивающиеся дефекты не по размерам, а по степени их опасности для контролируемого объекта. Возможность работы в реальном времени делает метод АЭ незаменимым при исследовании механизмов перестройки структуры твердого тела и контроле промышленных объектов. Кроме того, метод АЭ обладает рекордно высокой чувствительностью по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. При акустической эмиссии амплитуда колебаний поверхности твердого тела, как правило, не превышает нескольких нанометров, поэтому использование лазерного интерферометра – нанометра для калибровки (поверки) ПАЭ не вызывает сомнений, а абсолютная привязка к Государственному эталону единицы длины – метру, обеспечивает высокую достоверность полученных результатов.

Метод АЭ [7, 8] позволяет наблюдать и исследовать динамику процесса деформации, разрушения, перестройки структуры, химических реакций, взаимодействия излучения с веществом и т.п.

При детектировании АЭ используется явление пьезоэффекта (прямой и обратный эффект). Для этих целей применяются приемники акустической эмиссии (ПАЭ). В России выпускают приемники акустической эмиссии различных модификаций в промышленных масштабах, например, фирма «ГлобалТест». Обработку измерительных данных обеспечивает оборудование фирмы «Интерюнис». Качество этих средств находится на хорошем, современном уровне, и имеют возможность обновления.

Объектами тотального контроля являются магистральные нефте-газопроводы, химические и атомные реакторы, мосты, особо нагруженные элементы железнодорожных систем, оборудование ЖКХ и т.п. ПАЭ выпускают в виде различных модификаций и назначения, с встроенным усилителем или без него. В промышленности наибольшее распространение получили ПАЭ типа



Рис. 11. Преобразователь акустической эмиссии типа GT200, работающий в диапазоне частот (50-250) кГц

GT200, рисунок 11. При поверке/калибровке ПАЭ используется ЛИС-01М.

Чувствительность используемых в промышленности приборов АЭ, в которых для преобразования акустического сигнала в электрический используется пьезоэлектрическая керамика, позволяет выявлять образование трещины на площади $\sim 1 \times 1$ мкм². Для обнаружения дефектов меньших размеров необходимо использовать более совершенные методики выделения сигналов из шумов и более чувствительные пьезоматериалы для преобразователей АЭ.

К основным параметрам и техническим характеристикам акустических преобразователей относятся коэффициент преобразования “смещение – электрический сигнал”, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент затухания импульсной характеристики.

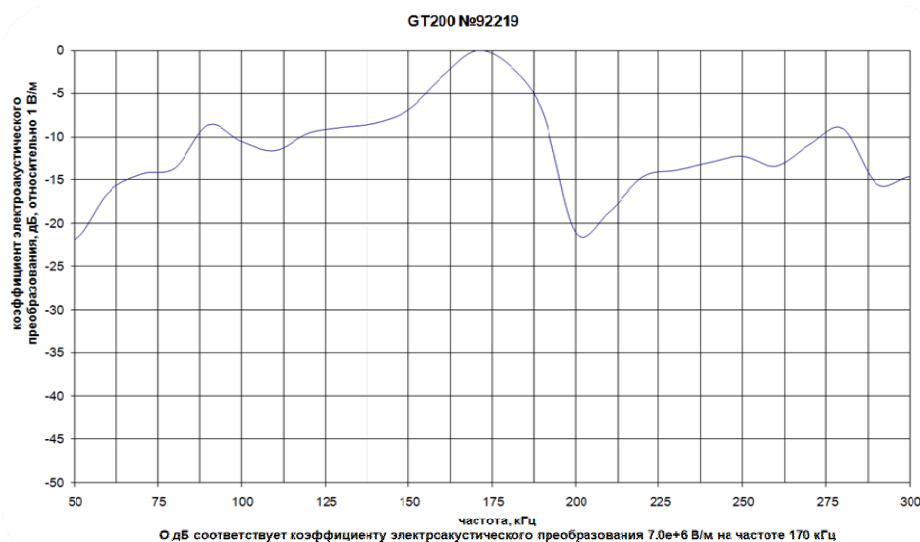


Рис. 12. Амплитудно-частотная характеристика серийно выпускаемого преобразователя АЭ типа GT200, измеренная по описанному методу



Рис. 13. География предприятий-заказчиков для поверки/калибровки систем неразрушающего контроля на территории России и ближнего зарубежья

ВЫВОДЫ

1. Разработан, запатентован и внедрен в промышленных масштабах экспресс-метод калибровки/поверки преобразователей акустической эмиссии.
2. Создан новый метод измерения наносмещений и программное обеспечение к нему, позволяющий в режиме диалога анализировать полученную информацию.
3. Создан новый класс измерительных систем, позволяющий эффективно синтезировать достижения в области фазометрии радио-диапазона с возможностями оптической интерферометрии-нанометрии.

Литература

1. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений / С.А. Дарзбек, Ж. Желкобаев, В.В. Календин, Ю.А. Новиков // Труды ИОФАН им. А.М. ПРОХОРОВА РАН. – Том 62. – С. 15–35.
2. Мезон У. Физическая акустика / Мезон У. – Москва : Мир, 1974. – Том VII. – 432 с.

3. Корпел А. Акустооптика / Корпел А. – Москва : Мир, 1988. – 240 с.
4. Магдич Л.Н. Акустооптические явления и их применение / Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. – Москва : Советское радио, 1978. – 112 с.
5. Арманова М.В. Измерение скорости и ускорения с помощью лазерного интерферометрического фазометра / М.В. Арманова, С.А. Дарзнец, Ж. Желкобаев, П.А. Тодуа // Сборник докладов 20-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2010. – Т. 2. – С. 326–335.
6. Арманова М.В. Лазерный гетеродинный интерферометр с прямым расчетом смещения подвижного зеркала по сигналу фотоприемника / М.В. Арманова, С.А. Дарзнец, Ж. Е. Желкобаев, П.А. Тодуа // Сборник докладов 22-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического Университета, 2012. – Том 2. – С. 225–231.
7. Авторское свидетельство № 1411572. Фазометр оптического диапазона / В.А. Григорьев, Ж. Желкобаев, В.В. Календин, В.И. Кухтевич, В.Я. Супьян, Г.Ф. Фролов, И.В. Троцишин. – 1988.
8. Патент № 2321849. Способ калибровки преобразователей акустической эмиссии и устройство для его реализации / Владимиров Б.Г., Желкобаев Ж., Календин В.В., Несмеянов С.С., Тодуа П.А. – 2008.
9. Иванов В.И. Методы и средства акустико-эмиссионной диагностики / В.И. Иванов // Неразрушающий контроль и диагностика : справочник. – Москва : Изд-во «Машиностроение», 2005. – С. 301–327.

References

1. Lazernyy interferometricheskiy izmeritel nanoperesmicheniy / S.A. Darznez, J. Jelkobaev, V.V. Kalendin, YU.A. Novikov // Trudy IOFAN im. A.M. PROKHOROVA RAN. – Tom 62. – S. 15–35.
2. Mezon U. Fizicheskaya akustika / Mezon U. – Moskva : Mir, 1974. – Tom VII. – 432 s.
3. Korpel A. Akustooptika / Korpel A. – Moskva : Mir, 1988. – 240 s.
4. Magdich L.N. Akustoopticheskie yavleniya i ih primeneniye / Magdich L.N., Molchanov V.YA. – Moskva : Sovetskoye radio, 1978. – 112 s.
5. Armanova M.V. Izmereniye skorosti i uskoreniya s pomoshchyu lazernogo interferometricheskogo fazometra / M.V. Armanova, S.A. Darznez, J. Jelkobaev, P.A. Todua // Sbornik dokladov 20-y Mejdunarodnoy konferentsii «Lazeryi. Izmereniya. Informatsiya». – Sankt-Peterburg : Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2010. – T. 2. – S. 326–335.
6. Armanova M.V. Lazernyy geterodinnyy interferometr s pryamyim raschetom smescheniya podvijnogo zerkala po signalu fotopriemnika / M.V. Armanova, S.A. Darznez, J. E. Jelkobaev, P.A. Todua // Sbornik dokladov 22-y mejdunarodnoy konferentsii «Lazeryi. Izmereniya. Informatsiya». – Sankt-Peterburg : Izd-vo Politehnicheskogo Universiteta, 2012. – Tom 2. – S. 225–231.
7. Avtorskoye svidetelstvo № 1411572. Fazometr opticheskogo diapazona / V.A. Grigorev, J. Jelkobaev, V.V. Kalendin, V.I. Kuhtevich, V.YA. Supyan, G.F. Frolov, I.V. Trotsishin. – 1988.
8. Patent № 2321849. Sposob kalibrovki preobrazovateley akusticheskoy emissii i ustroystvo dlya ego realizatsii / Vladimirov B.G., Jelkobaev J., Kalendin V.V., Nesmeyanov S.S., Todua P.A. – 2008.
9. Ivanov V.I. Metodyi i sredstva akustiko-emissionnoy diagnostiki / V.I. Ivanov // Nerazrushayuschiy kontrol i diagnostika : spravochnik. – Moskva : Izd-vo «Mashinostroeniye», 2005. – S. 301–327.

Рецензія/Peer review : 8.9.2018 р. Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

УДК 537.8; 537.8.029; 537.876; 621.396.67

Д.А. ВОВЧУК, С.Д. ГАЛЮК

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАМАТЕРІАЛІВ (ОГЛЯД)

У роботі проаналізовано можливості використання метаматеріалів у антенних системах. Незвичайні властивості таких матеріалів ($\epsilon < 0$ та/або $\mu < 0$) дають змогу покращити випромінюючу здатність антен, зменшити їх розміри, збільшити смугу робочих частот, а також звузити діаграми спрямованості та забезпечити необхідний рівень коефіцієнта підсилення антен. Застосування метаматеріалів у антенних конструкціях дозволяє подолати обмеження Чу. Структура роботи дозволяє поетапно прослідкувати за процесом синтезу метаматеріалів на основі простих прикладів.

Ключові слова: метаматеріали, метаструктури, антени, діаграма спрямованості, діапазон частот.

S.D. HALIUK, D.A. VOVCHUK
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

ENHANCEMENT OF ANTENNAS CHARACTERISTICS USING METAMATERIALS (SURVEY)

In this paper the topical radio engineering issue of the enhancement of antennas characteristics was reviewed. This is due to the fact that the fast grow of requirements to the modern antenna devices that include the decreasing of their dimensions, increasing of the operation frequency range, gain, as well as providing of the needed directivity of their radiation pattern. One of the prospective approaches to solve this problem is to use the so-called metamaterials that is an electromagnetically homogenous arrangement of artificial structural elements, designed to achieve advantageous and unusual electromagnetic properties ($\epsilon < 0$ and/or $\mu < 0$). In the paper the metastructures based on split ring resonators (SRRs) or cutting square SRRs (magnetic negative metamaterials – MNG) were considered. Such elements can be used as the inclusions of dielectric substrates for printed antennas. It improves radiation efficiency and allows to control of the width of radiation pattern compared with the case when SRRs are absent. Another type of metamaterials that possess by negative value of permittivity (ENG) includes structures such as semisphere shell and parallel metallic wires. First one makes possible overcoming the Chu's limit. Second metastructure gives the possibility of the width of radiation pattern. The broadband radiation can be reached by irregular wire metastructure that experimentally examined at microwave frequency range. Finally, the survey shows the simple way to synthesize the double negative metamaterials by combination of MNG and MNG components. It allows to increase the radiation gain and enhance the directivity of antennas due to better matching between metamaterial and modified antennas.

Keywords: metamaterial, metastructure, antenna, radiation pattern, frequency range.

Вступ

Сучасні системи зв'язку вимагають мінітюаризації розмірів приладів та підвищення функціональної здатності їх модулів. Існуючі підходи майже вичерпали здатність задовольняти необхідні вимоги, що висуваються до пристроїв, які функціонують у діапазоні високих, надвисоких частот та вище.

Є багато робіт, де вивчаються перспективні матеріали та конструкції на їх основі, так звані метаматеріали, – електрично однорідні штучно структуровані елементи, що дозволяють досягнути незвичайних електромагнітних (ЕМ) властивостей [1]. Такі властивості пояснюються від'ємними значеннями діелектричної та/або магнітної проникностей ($\epsilon < 0$ та/або $\mu < 0$), відповідно [2–4]. Матеріали з $\epsilon > 0$ та $\mu > 0$ називають подвійно позитивними (double positive, DPS), $\epsilon > 0$ та $\mu < 0$ – магнетонегативні (magnetically negative, MNG), $\epsilon < 0$ та $\mu > 0$ – електрично негативні (electrically negative, ENG), а також $\epsilon < 0$ and $\mu < 0$ – подвійно негативні (double negative, DNG). Як відомо, до першого класу із природних матеріалів відповідно до приведеної класифікації можна віднести діелектрики; до другого – плазму; до третього – гіротропні магнетики; в то час як матеріали, які б можна було віднести до четвертого класу, на даний момент не були виявлені у природі, проте можуть бути штучно реалізованими [2].

У наш час метаматеріали вже знайшли своє застосування у антенних технологіях для покращення випромінювання елементарних антен та розширення їх частотної смуги, що веде до можливості функціонування, долаючи обмеження Чу [5, 6]; розширення можливостей друкованих антен, що дає змогу зменшення взаємного впливу елементів антенних масивів, а також, навпаки, досягнення вузької діаграми спрямованості з більшим коефіцієнтом спрямованості та підсилення [7].

Метою даної роботи є огляд існуючих підходів до модифікації антенних випромінювачів для покращення їх характеристик з використанням метаматеріалів.

Метаматеріали у антенних технологіях

MNG метаструктури. Існує багато типів MNG структур, серед яких подвійні кільцеві резонатори (split ring resonator, SRR) [8–10] (рис. 1, а) або розрізні квадратні SRR (cutting square SRR) [11, 12] (рис. 1, б), металеві трубки чи роли [13], S-подібні елементи [14] тощо. Використання набору MNG елементів як підкладок друкованих антен забезпечує можливість розширення смуги частот при випромінюванні ЕМ хвиль у вільний простір. Найбільш поширеним є використанням MNG структур при конструюванні підкладок патч-антен, що можуть знайти застосування у МІМО технологіях для зменшення взаємних впливів сусідніх елементів антени [15, 16].

Структура, що наведена на рис. 2, складається із діелектричного блоку висотою t , який навантажено SRR включеннями вздовж осі x з періодом d_x та вздовж осі z з періодом d_z . Патч-антена безконтактно розміщена на поверхні структури. Це дозволяє підвищити пропускну здатність та ефективність

випромінювання таких антен в порівнянні із відповідними характеристиками антен на звичайній діелектричній підкладці [15].

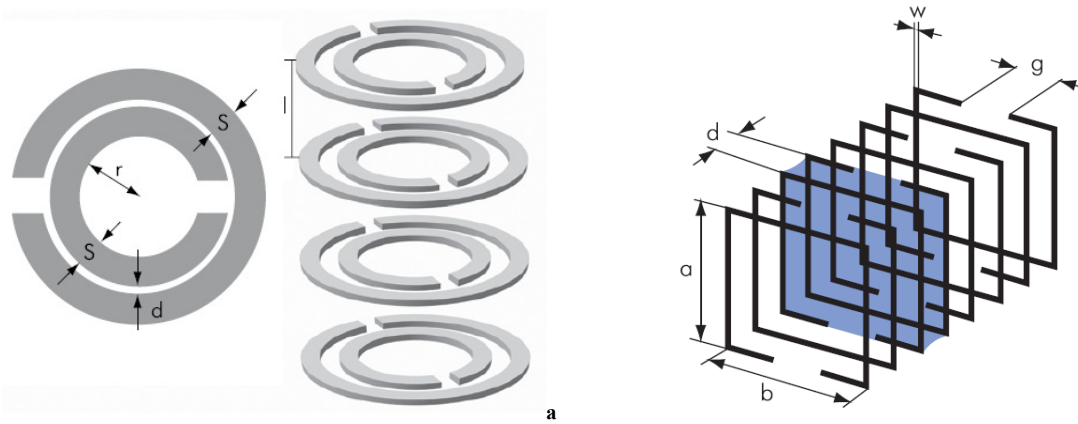


Рис. 1. Структури, що володіють від’ємним значенням магнітної проникності: а) подвійні кільцеві резонатори [8] та б) розрізні квадратні резонатори, що формують соленоїд [11]

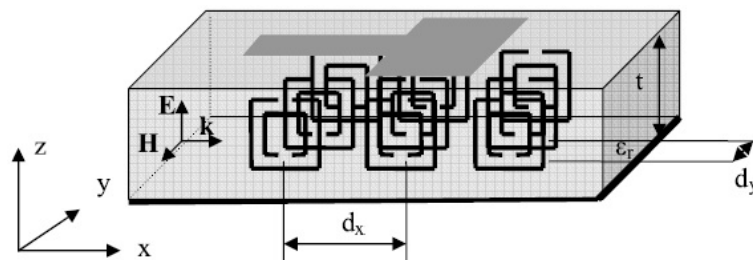


Рис. 2. Антенна конструкція з MNG елементами підкладкою на основі розрізних квадратних SRR, вмонтованими в діелектричну підкладку, що забезпечує покращення процесу випромінювання патч-антени [15]

Ще один підхід до розробки метапідкладок для досягнення високого значення коефіцієнту підсилення патч-антен розглянуто в роботі [16]. Запропоновану модифікацію показано на рис. 3. Структура складається з двох шарів із круговими отворами із заданим значенням розмірів елементарних комірок та відстанями між їх центрами. На відміну від попереднього випадку, патч-антена розміщена в основі структури на тонкому шарі діелектрику, як показано на рис. 3. Діаграма спрямованості запропонованої антени є більш вузькою (25° та 27° у площинах $x-z$ та $y-z$, відповідно рис. 3, б та в – суцільна лінія), ніж у випадку патч-антени із звичайною діелектричною підкладкою (63° та 117° у площинах $x-z$ та $y-z$, відповідно рис. 3, б та в – суцільна лінія із точками). Також, запропонована модифікація дозволяє збільшити коефіцієнт підсилення антени від 6,8 дБ до 17,2 дБ [16].

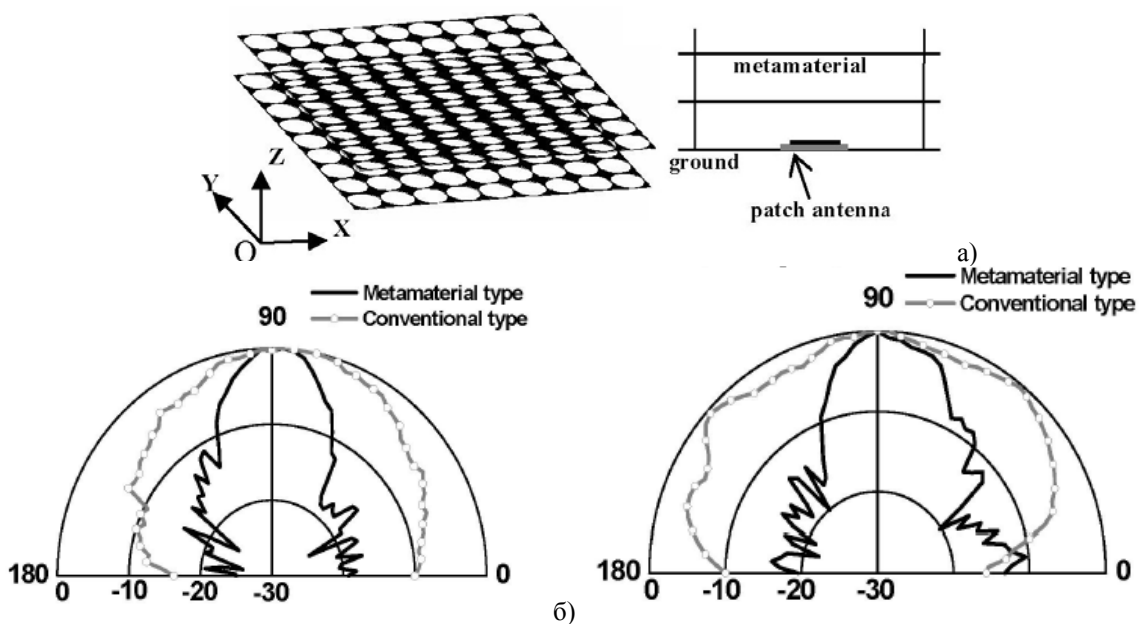


Рис. 3. Конструкція, що складається з двох шарів із круговими отворами та дозволяє покращити випромінювання патч-антени, розміщеної в основі структури (а) та діаграми спрямованості у площинах $x-z$ (б) та $y-z$ (в) без (суцільна лінія із точками – Conventional type) та із (суцільна лінія – Metamaterial type) використанням метаструктури [16]

ENG метаструктури. Основним принципом застосування ENG-матеріалів є зменшення великого значення реактивної складової електрично малих антен. Для прикладу, розглянута у [17] метаоболонка (півсфера, що характеризується негативним значенням діелектричної проникності) розміщена по центрі коаксимальної лінії передавання чвертьхвильового випромінювача і повністю покриває плече монополя (рис. 4). При цьому, для отримання необхідного ефекту, товщина оболонки повинна бути менша, ніж $\lambda/100$ довжини хвилі резонансної частоти монополя. Таким чином, поєднання DPS складової монополя із ENG-півсферою, які складають ємнісну та індуктивну складові відповідно, формує LC-резонатор [5]. Така модифікація чвертьхвильової антени дозволяє підвищити добротність антени та перевищити обмеження Чу в 1,583 разів [5], не зважаючи на той факт, що здатність такої антени випромінювати сильно обмежена та можлива тільки на резонансній частоті [18, 19]. Одним із основних висновків, що можна зробити із роботи [5], є також збільшення потужності випромінювання модифікованої антени на резонансній частоті на 60–65 дБ, в порівнянні із випадком, коли метаоболонка відсутня.

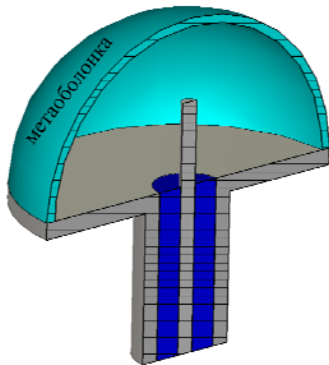


Рис. 4. Переріз електрично малої $\lambda/4$ антени, модифікованої ENG метаоболонкою

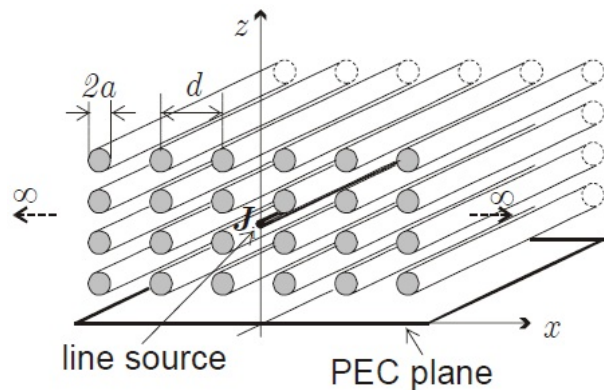


Рис. 5. Структура із нескінченної кількості паралельних металевих провідників та металевим екраном (PEC plane), що опромінюється джерелом електричних сигналів (line source) [21]

Використання DNG метаоболонки замість ENG, дозволяє зменшити радіус півсфери, забезпечуючи ті ж самі властивості чвертьхвильової антени. Це пояснюється додатковою ємністю, що вноситься DNG елементом [5].

Ще одна ENG структура може бути отримана шляхом впорядкованого розміщення металевих провідників довжиною L та діаметром $2a$, вмонтованих у діелектричну матрицю паралельно один одному з періодом d (рис. 5). Відстань між провідниками та їх радіус повинні задовольняти необхідному значенню фактору заповнення металу [20]. Структура на рис. 5 включає також металевий екран (PEC plane) та відображає імітаційну модель, що досліджувалась в [21]. Якщо випромінювач та провідники ENG структури одночасно розміщені вздовж осі y , то це приведе до звуження діаграми спрямованості та дає можливість керувати її шириною за рахунок зміни параметрів структури.

Одним із перспективних напрямків використання структури із паралельних металевих провідників є передавання зображень [22]. Проте, тривалий час передавання ЕМ енергії було можливо здійснювати тільки на частотах резонансів Фабрі-Перо, коли довжина структури співкратна довжині півхвилі резонансної частоти випромінювання джерела. Принцип процесу передавання зображень полягає в тому, що площина зображення розміщується перед інтерфейсом структури, а його ідентифікація проводиться шляхом аналізу розподілу електричного поля на приймальній стороні. Процеси передавання зображень таким способом є вузькосмуговими. Суттєвою перевагою такого типу метаструктур є можливість їх застосування у різних діапазонах частот, оскільки численними роботами підтверджується можливість їх синтезу розмірами до декількох сотень нанометрів [23–25].

Не зважаючи на попередні твердження, нещодавно було доведено можливість використання структур із паралельних провідників для вирішення задач ширококутності [26, 27]. Це можливо зробити, якщо джерело випромінювання безконтактно розмістити безпосередньо у структуру між провідниками структури. У роботах [26, 27] виконано дослідження процесу ширококутового передавання ЕМ енергії через повітряний проміжок між двома хвилеводними портами, розміщеними один навпроти одного, як показано на рис. 6. Дослідження включають порівняння S_{21} -параметрів для двох випадків, коли передавання відбувається без та із структурою розміщеною між портами. У першому випадку ЕМ енергія сильно розсіюється у вільний простір, а середнє значення S_{21} -параметрів становить $-4,5$ дБ у частотному діапазоні $0,9...2$ ГГц (одномодовий режим роботи використовуваних хвилеводів). Якщо розмістити метаструктуру між хвилеводами, вмонтувавши її на 5 мм у кожний із портів, отримується покращення передавання ЕМ сигналів у $2,24$ рази. У діапазоні частот $0,9...12$ ГГц (багатомодовий режим використовуваних хвилеводів) середнє значення покращення передавання становить $3,78$ разів.

У роботі [28] доведено, використання розглянутої структури як антени для випромінювання у вільний простір є можливим тільки на частотах резонансів Фабрі-Перо. Для того, щоб дослідити можливість

випромінювання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот, було досліджено три види провідникових метаструктур (рис. 7). Перша із них є подібною до розглядуваних у роботах [26, 27] – набір із паралельних металевих провідників (рис. 7, а). Наступною є структура із впорядкованих провідників, розміщених під певним визначеним кутом відносно центральної осі та відносно сусідніх провідників – гіперлінза (рис. 7, б) [29]. Останньою структурою, яка вперше запропонована у роботі [28], є структура із невпорядковано розміщених провідників (рис. 7, в), яка може бути розглянута як набір надзвичайно великої кількості локальних гіперлінз із різною довжиною провідників та величиною кутів рознесення, в той час як її загальні розміри відповідають розмірам структури на рис. 7, а.

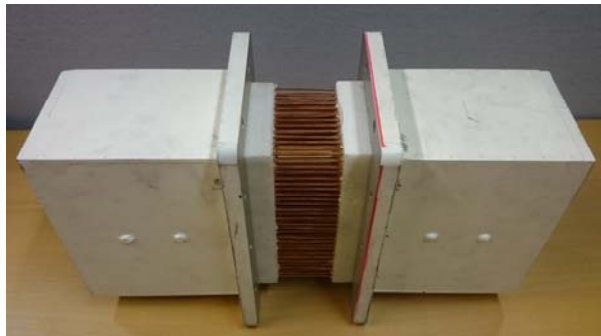


Рис. 6. Експериментальна установка, що складається з двох хвильовідних портів та структурою із паралельних металевих провідників, вмонтованою на 5 мм у кожен із них [26]

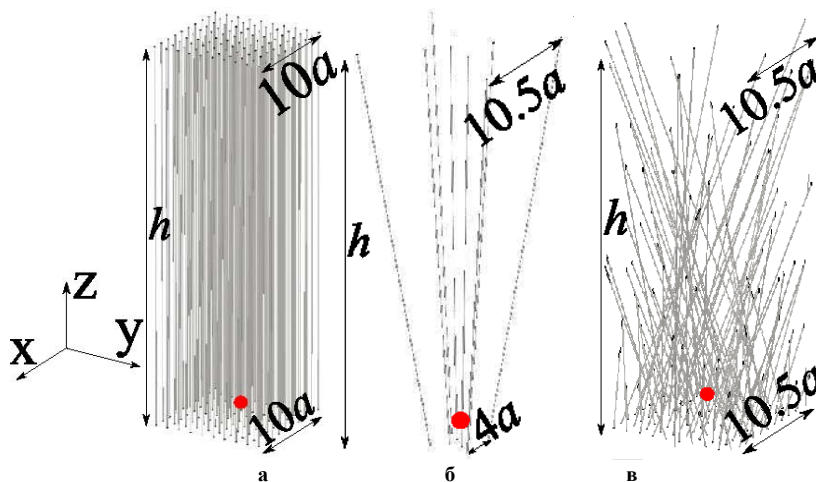


Рис. 7. Досліджувані у [28] метаструктури для покращення випромінювання ЕМ: а) набір паралельних металевих провідників; б) гіперлінза; в) набір невпорядковано розміщених провідників

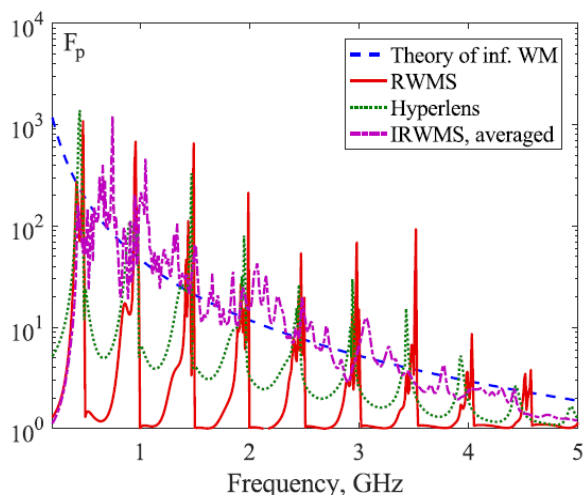


Рис. 8. Частотна залежність фактору Парсела для теоретично розрахованої (пунктирна лінія – Theory of inf. WM) структури із паралельних провідників нескінченних розмірів, досліджуваної структури із паралельних провідників (суцільна лінія – RWMS), гіперлінзи (точкова лінія – Hyperlens) та структури із невпорядковано розміщених провідників (штрихпунктирна лінія – IRWMS, averaged) [28]

Результати імітаційного моделювання показали, що джерело ЕМ сигналів, модифіковане структурою із паралельних провідників, випромінює на частотах резонансів Фабрі-Перо, що характеризується значеннями фактору Парсела порядку $10^1 \dots 10^3$ у досліджуваному діапазоні частот 1...5 ГГц. На частотах відмінних від резонансних випромінювання відсутнє, що пояснюється значенням фактору Парсела рівним 10^0 (рис. 8 – суцільна лінія).

Гіперлінза характеризується такими ж високими значеннями фактору Парсела на частотах

резонансів Фабрі-Перо та, на відміну від попереднього випадку, вищими його значеннями (до 10^1) між резонансними частотами. Результати моделювання для структури із невпорядкованим розташуванням провідників показують, що значення величини фактору Парсела в середньому подібне до теоретично розрахованого для математичної моделі безкінечної структури із провідників [28]. Це означає, що структура із невпорядковано розміщених провідників може використовуватися для випромінювання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот.

Експериментальні установки для дослідження випромінювання структурами із паралельним та випадковим розміщенням провідників приведені на рис. 9, а та б відповідно. Якщо апертуру хвильоводного порту, що використовувалась як джерело сигналів, навантажити індуктивною діафрагмою, то отримується джерело, що випромінює слабо. Такий підхід використовувався у [28], що підтверджується пунктирною лінією на рис. 10 у досліджуваному діапазоні частот (1...1,8 ГГц). У першому випадку отримано випромінювання на частотах 1,04 та 1,17 ГГц (рис. 10 – точкова лінія). Структура ж на рис. 9, б демонструє широкосмуговий ефект, що займає діапазон частот від 1,08 до 1,46 ГГц (рис. 10 – суцільна лінія).

Також у роботі [28] було досліджено покращення випромінювання дипольної антени у смузі частот, що не містить власних резонансів диполя. Якщо диполь безконтактно вмонтований у структуру із паралельних провідників на відстань рівну кроку метаструктури, то така система забезпечує випромінювання на частотах 2,7 та 4,3 ГГц (рис. 11 – суцільна лінія). На частотах відмінних від резонансних – значення фактору Парсела очікувано рівні 1. У випадку невпорядкованої структури отримується випромінювання у всьому досліджуваному діапазоні 2...5 ГГц (рис. 11 – пунктирна лінія), що підтверджується значенням фактору Парсела більшими 1.



Рис. 9. Експериментальні установки для дослідження випромінювання ЕМ коливань структурами із паралельним (а) та із невпорядкованим розміщених (б) провідників

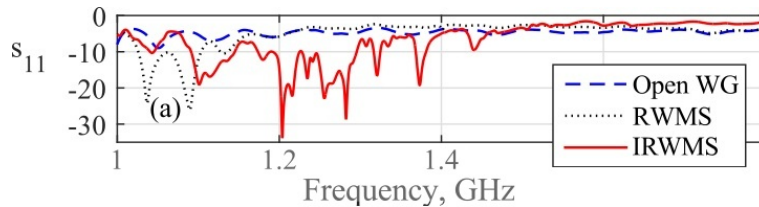


Рис. 10. Отримані експериментальним шляхом результати коефіцієнту відбивання S_{11} при випромінюванні індуктивно навантаженою апертурою хвильоводу у вільний простір (пунктирна лінія – Open WG), із вмонтованою структурою із паралельних провідників (точкова лінія – RWMS) та невпорядковано розміщених провідників (суцільна лінія – IRWMS) [28]

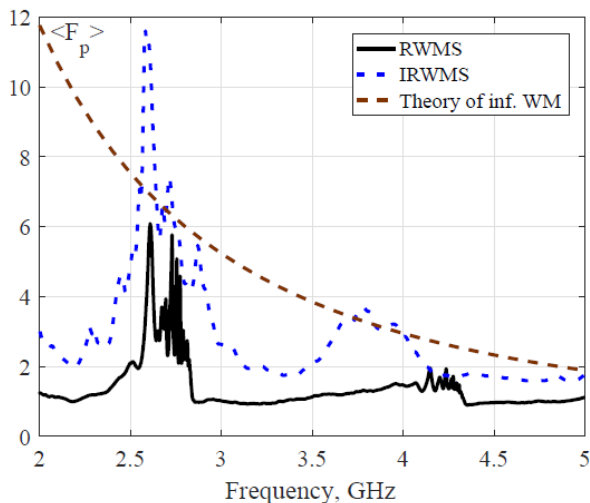


Рис. 11. Експериментально отримані частотні залежності значень фактору Парсела при випромінюванні ЕМ сигналів з використанням структури із паралельних провідників (суцільна лінія – RWMS), із випадково розміщених провідників (точкова лінія – RWMS) та теоретично розрахунок структури (пунктирна лінія – Theory of inf. WM) [28]

резонаторів чи розрізних квадратних резонаторів (ENG та MNG, відповідно) розробляють DNG середовища (рис. 12) [30, 31]. Структура, що приведена на рис. 12, б, експериментально досліджена у [31]. Структурні компоненти реалізовані друкованим методом та почергово розміщені у паралельних площинах. Чвертьхвильова антена використовувалась як джерело сигналів і вмонтовувалась всередину метаматеріалу у центрі нижньої частини структури. Результати досліджень показали строго направлену діаграму спрямованості у порівнянні з випадком, коли чвертьхвильова антена випромінює у вільний простір без метаструктури (рис. 13).

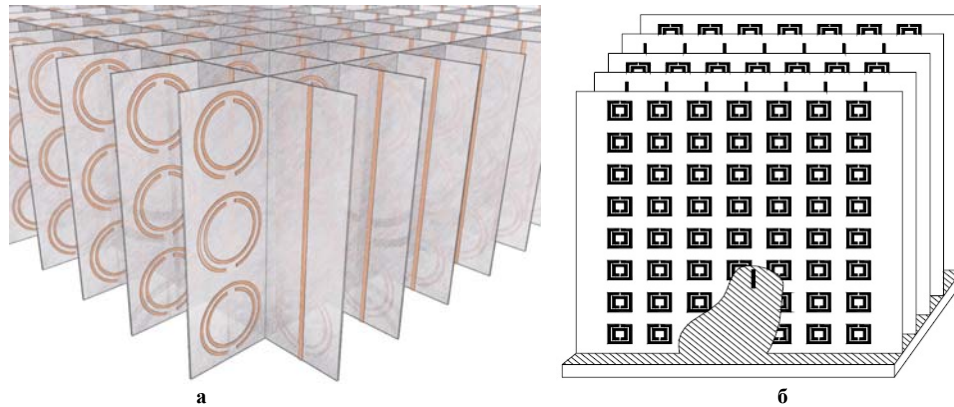


Рис. 12. Структура із паралельних провідників і подвійних кільцевих резонаторів (а) [30] та модифікація чвертьхвильової антени шляхом її вмонтування в основі DNG метаматеріалу, що складається із розрізних квадратних резонаторів (б) [31]

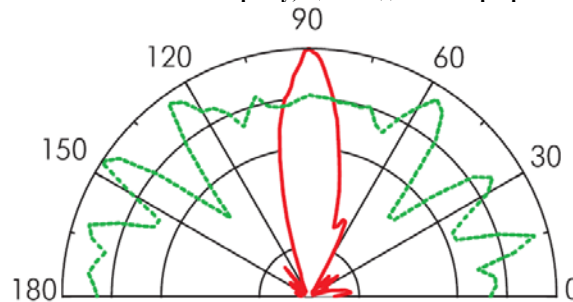


Рис. 13. Діаграми спрямованості монопольної антени при її випромінюванні у вільний простір (пунктирна лінія) та при її безпосередній модифікації подвійно негативною метаструктурою, що приведена на рис.12, б (суцільна лінія) [31]

Висновки

У роботі наведено класифікацію матеріалів з точки зору таких електродинамічних характеристик як діелектрична ϵ та магнітна μ проникності. На основі цього, здійснено огляд можливих застосувань метаматеріалів для покращення процесів випромінювання антен. Показано, що за допомогою метаматеріалів різних конструкцій та шляхом зміни значень їх параметрів, можна забезпечити покращення випромінювання елементарних антен, зменшити їх розміри, розширити смугу робочих частот, а також сформувані діаграми спрямованості та необхідний рівень підсилення антени.

Для уможливлення контролю ширини діаграми спрямованості, здійснюються модифікації діелектричних підкладок шляхом включення розрізних кільцевих резонаторів різної форми (MNG метаматеріал) або шляхом розміщення лінійного випромінювача в структурі із паралельних провідників (ENG метаматеріал) у напрямку провідників. Забезпечення роботи у широкому діапазоні частот можливе з використанням структур і невпорядкованим розміщенням провідників, що підтверджується відповідними частотними залежностями фактору Парсела.

З допомогою синтезу DNG метаматеріалів можна досягнути кращому узгодженню індуктивної та ємнісної реактивних складових, ніж окремо MNG чи ENG матеріалів.

Дана оглядова робота стане корисною для дослідників, розробників та конструкторів антен, що повинні забезпечувати задані характеристики.

Література

1. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic // *Metamaterials*. – 2008. – Vol. 1, no. 1. – P. 2–11.
2. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations* // Edited by Engheta N. and Ziolkowski R. W. – Wiley-IEEE Press. – 2006. – 414 p.
3. Eleftheriades G. V., Balmain K. G. *Negative Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications* // Wiley-VCH, Weinheim, Germany. – 2005.
4. Capolino F. *Metamaterials Handbook 1: Theory and Phenomena of Metamaterials* // CRC Press, Boca Raton, CA, 2009.
5. Ziolkowski R. W., Erentok A. *Metamaterial-Based Efficient Electrically Small Antennas* // IEEE

Transactions on Antennas and Propagation. – July 2006. – Vol. 54. – No. 7. – P. 2113–2130.

6. Stuart H. R., Pidwerbetsky A. Electrically Small Antenna Elements Using Negative Permittivity Resonators // Strategic White Paper. – 2006. – P. 10–19.
7. Slyusar V.I. Metamaterials on Antenna Solutions // Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, Lviv, Ukraine. – 6–9 October 2009. – P. 19–24.
8. Kostin M.V., Shevchenko V.V. Artificial magnetics based on double circular elements // Proceeding of Bianisotropics'94. – 1994. – P' erigueux, France. – P. 49–56.
9. Pendry J.B., Holden A. J., Robins D. J. and Stewart W. J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. – Vol. 47. – No. 11. – P. 2075–2084.
10. Marques R., Medina F. and Ruffi-el-Idrissi R. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials // Physical Review B. – 2002. – Vol. 65. – P. 144440 (1–6).
11. Ikonen P., Maslovski S.I., Tretyakov S.A. and Kolmakov I.A. New artificial high-permeability material for microwave applications // Progress in Electromagnetics Research Symposium, Pisa, Italy. – March 2004. – P. 485–488.
12. Maslovski S., Ikonen P., Kolmakov I., Tretyakov S. and Kaunisto M. Artificial magnetic materials based on the new magnetic particle: metasolenoid // Progress In Electromagnetics Research (PIER). – 2005. – Vol. 54. – P. 61–81.
13. Schneider H.J. and Dullenkopf P. Slotted tube resonator: A new NMR probe head at high observing frequencies // Rev. Sci. Instrum. – 1977. – Vol. 48. – no. 1. – P. 68–73.
14. Neil P. Theory, Simulation, Fabrication and Testing of Double Negative and Epsilon Near Zero Metamaterials for Microwave Applications // Master's Thesis in Electrical Engineering. – June 2008. – P. 165.
15. Mookiah P., Dandekar K.R. Metamaterial-Substrate Antenna Array for MIMO Communication System // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. – vol. 57. – no. 10. – P. 3283–3292.
16. Semichaevsky A., Akyurtlu A. Homogenization of Metamaterial-Loaded Substrates and Superstrates for Antennas // Progress In Electromagnetics Research. – 2007. – Vol. 71. – P. 129–147.
17. Weng Z.-B., Wang N.-B., Jiao Y.-Ch. Study on High Gain Patch Antenna with Metamaterial Cover // 7th Int. Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. – 2006.
18. Wheeler H. A. Fundamental limitations of small antennas // Proceeding IRE. – 1947. – P. 1479–1484.
19. Chu L.J. Physical Limitations of Omni-Directional antennas // Journal of Applied Physics. – December 1948. – Vol. 19. – P. 1163–1175.
20. Kosulnikov S. Yu., Yankovskaya E. A., Maslovski S. I., Belov P. A. and Kivshar Yu. S. Optimal filling factor of nanorod lenses for subwavelength imaging // Physical Review A 84. – 2011. – 065801 (1–4).
21. Burghignoli P. *et. all* Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire-Medium Slabs: Physical Mechanisms and Full-Wave Analysis. – P. 113–116.
22. Simovski C. R., Belov P. A., Atrashchenko A. V. and Kivshar Y. S., Wire metamaterials: physics and applications // Advanced Materials. – 2012. – 24. – 4229 (1–20).
23. Belov P. A., Zhao Y., Tse S., Ikonen P., Silveirinha M. G., Simovski C. R., Tretyakov S., Hao Y., Parini C. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range // Physical Review B. – 2008. – 77. – 193108 (1–4).
24. Silveirinha M. G., Belov P. A., Simovski C. R. Ultimate limit of resolution of subwavelength imaging devices formed by metallic rods // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33. – no. 15. – P. 1726–1728.
25. Wurtz G. A., Pollard R., Hendren W., Wiederrecht G., Gosztola D., Podolskiy V., Zayats A. Designed ultrafast optical nonlinearity in a plasmonic nanorod metamaterial enhanced by nonlocality // Nature Nanotechnol. – 2011. – Vol. 6. – P.107–111.
26. Vovchuk D., Kosulnikov S., Nefedov I., Tretyakov S. and Simovski C. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Medium Slab // Progress in Electromagnetics Research. – 2015. – Vol. 154. – P. 171–180.
27. Kosulnikov S., Vovchuk D., Nefedov I., Tretyakov S. and Simovski C. Broadband Power Transfer Through a Metallic Wire Medium Slab // URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS), Espoo, Finland. – 2016. – P. 596–599.
28. Kosulnikov S.Yu., Mirmoosa M.S., Vovchuk D.A., Tretyakov S.A., Glybovski S.B. and Simovski C.R. Enhancement of Radiation with Irregular Wire Media // IEEE Transactions an Antennas and Propagation. – 2016. – P. 596–599.
29. Kosulnikov S., Filonov D., Glybovski S., Belov P., Tretyakov S., Simovski C. Wire-Medium Hyperlens for Enhancing Radiation From Subwavelength Dipole Sources // IEEE Transactions an Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63. – P. 4848–4856.
30. Asadchy V. Spatially dispersive metasurfaces // PhD Thesis, Department of Electronics and Nanoengineering, Aalto University. – 2017. – 113 p.
31. Sui Q., Li C., Li L.L., Li F. Experimental Study of $\lambda/4$ Monopole Antennas in a Left-Handed Meta-Material // Progress in Electromagnetics Research. – 2005. – no. 51. – P. 281–293.

Рецензія/Peer review : 22.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.

Рецензент: к.т.н., доц. Озирковський Л.Д.

МЕТОДИКА НАЛАШТУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ГІРОТАХОМЕТРА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ТАХОМЕТРА У ВИРОБАХ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ

Представлено методику налаштування передавальних коефіцієнтів по каналу вертикального наведення компенсаційного гіротахометра і електромеханічного тахометра, яка не вимагає використання башти. Методика замінює трудомісткі операції, які необхідно проводити у складі башти на спрощену методику налаштувань на технологічному стенді. Для порівняння приведена методика налаштування коефіцієнтів у складі башти і методика налаштування коефіцієнтів на технологічному стенді. Методика налаштування коефіцієнтів у складі башти передбачає, що компенсаційний гіротахометр ГТ-К знімають зі штатного посадочного місця на башті та встановлюють на спеціальну бонку на блоці озброєння (на гарматі) аналогічно гіротахометру ГТ-ВН. Спеціальним технологічним кабелем електричні сигнали від ГТ-К подаються на вхід гіротахометра ГТ-ВН, при цьому в кабелі полярність сигналів ГТ-ВН змінюється на протилежну. Потім проводиться компенсація нульових сигналів гіротахометра ГТ-К за допомогою регульовального резистора БГТ приводу ВН. Блок озброєння за допомогою ручки вертикального редуктора встановлюється на кут ≈ 5 градусів. По цифровому вольтметру Ц4313 (вимір постійної напруги), підключеному до виводів "ГТ+ТГ" і "ВН загальний" контрольного роз'єму на блоці управління БУ-Ш4, контролюється сигнал гіротахометра "ГТ+ТГ" в момент, коли блок озброєння рухається вгору з максимально можливою швидкістю від ручного приводу механізму підйому. Показання цифрового вольтметра при цьому не повинно перевищувати 1 ділення шкали - на межі шкали вимірів 1,5 В. У разі перевищення необхідно регульовальним резистором ГТ приводу ВН добитися необхідного свідчення.

Ключові слова: стабілізатор, гіроскоп, чутливий елемент.

V.G. TSIRUK

Public joint stock company «Research-and-Production association «Kyiv automatics plant»

METHODOLOGY OF TUNING OF COEFFICIENTS OF COMPENSATIVE RATE GYROSCOPE AND ELECTROMECHANICAL OF TACHOMETER IN WARES OF LIGHT VEHICLES

Original methodology of tuning of transmission coefficients is presented on the channel of the vertical aiming compensative gyroscope and electromechanical of tachometer, that does not require the use of tower. A chart over of placing of pickoffs of stabilizer is brought on a technological stand for realization of tincture and verification of parameters. A chart over of electric connections of devices of stabilizer, sequence of implementation of operations, is brought at tuning. Methodology replaces labour intensive operations that must be conducted in composition a tower on the simplified methodology of tuning on a technological stand. For comparison methodology over of tuning of coefficients in composition a tower and methodology of tuning of coefficients are brought on a technological stand. Methodology of tuning of coefficients provides for in composition a tower, that compensative gyroscope ГТ-К take off from a regular landing place to the tower and set on special place on the block of вооружения (on a cannon) like gyroscope ГТ-ВН. By the special technological cable electric signals from ГТ-К are given on the entrance of gyroscope ГТ-ВН, here in a cable polarity of signals of ГТ-ВН changes on opposite. Indemnification of zero signals of gyroscope ГТ-К is then conducted through the regulation resistor of БГТ of drive of ВН. Farther the block of armament through the handle of vertical reducing gear is set on a corner ≈ 5 degrees. On the digital voltmeter of Ц4313 (measuring of permanent tension), connected to the nests of "ГТ+ТГ" and "ВН general" control socket of Ш4 of gyroscope CU the signal of gyroscope "ГТ+ТГ" is controlled in moment when the block of armament moves upwards with maximally possible speed from the hand drive of mechanism of getting up. The testimonies of digital voltmeter here must not exceed a 1 division of scale - on the limit of scale of measuring 1,5 В. In case of exceeding it is necessary the regulation resistor of ГТ of drive of ВН to obtain of the required testimony.

Keywords: stabilizer, gyroscope, pickoff.

Вступ

В сучасних умовах розвитку промисловості на зміну аналоговим стабілізаторам озброєння, апаратна частина, яких була побудована з використанням «жорсткої» логіки роботи, реалізованої на транзисторах, діодах, резисторах, прийшли нові цифрові стабілізатори озброєння, основу схемно-технічних рішень яких покладено на цифрові мікропроцесори, що дозволяють зміною програмно-алгоритмічного забезпечення, яке виконується перепрограмуванням, змінювати логіку роботи цифрового стабілізатора без втручання в апаратну частину. Використання нових апаратно-програмних рішень побудови стабілізаторів з використанням цифрових мікропроцесорів привело до необхідності перебудови всього технологічного циклу виготовлення, налаштування та випробувань стабілізаторів, що в свою чергу вимагає розробки нових методик, в тому числі методик налаштування. Але поряд з новими цифровими стабілізаторами озброєння в експлуатації зостається велика кількість аналогових стабілізаторів озброєння, в приладовий склад яких також, як і в цифрових, входять компенсаційні гіротахометри та тахометри електромеханічні, тому методика налаштування передавальних коефіцієнтів вказаних вище блоків повинна поширюватись на стабілізатори обох типів.

Методика налаштування коефіцієнтів компенсаційного гіротахометра та тахометра електромеханічного у складі аналогового стабілізатора 2Э36-1, яка наведена у [1], передбачає проводити ці налаштування за допомогою часових викруток на технологічній башті на підприємстві, на якому виготовляють стабілізатори озброєння. В сучасних цифрових стабілізаторах озброєння коефіцієнти налаштування вводяться регульовальником з цифрових пультів управління, тому необхідності в часових

викрутках немає, але застосування технологічної башти необхідно.

Застосування в технологічному процесі налаштування башти, навіть технологічної, збільшує трудомісткість робіт, не кажучи про необхідність мати додаткове дороге громіздке обладнання у вигляді технологічної башти.

Мета даної роботи – розробити методику налаштування коефіцієнтів компенсаційного гіротахометра та електромеханічного тахометра у складі стабілізатора без використання дорогого громіздкого обладнання у вигляді технологічної башти (рис. 1) на налаштування на технологічному стенді СТМ02 (рис. 2), де проводиться налаштування, прийнятно-здавальні випробування, зменшивши при цьому трудомісткість робіт.

В якості порівняння характеристик технологічної башти та стенду можна зауважити:

- по перше, собівартість башти, яку треба придбати, в 30 разів дорожча за СТМ02;
- по друге, необхідно демонтувати апаратуру 2Э36-1 з башти, при чому вага одного блоку управління двигуном одного каналу 12 кг;
- по третє, необхідно всі прилади стабілізатора змонтувати на свої посадкові місця у башті;
- по четверте, придбання башти для виконання тільки одного виду налаштування, а інші налаштування проводити на стенді не має сенсу.



Рис. 1. Технологічна башта

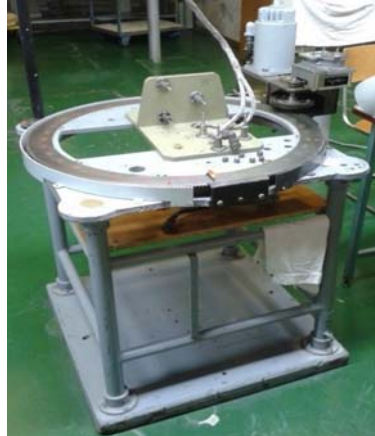


Рис. 2. Стенд СТМ02



Рис. 3. Апаратура перевірки стабілізатора:

- 1 - блоки керування двигунами;
- 2 – цифровий блок управління;
- 3 – контрольно-перевірочний пульт (КП);
- 4, 5 – цифрові пульти керування

В багатьох стабілізаторах озброєння легкої броньованої техніки в вертикальному каналі наведення (ВН) в якості чутливого елемента використовується сенсор кутової швидкості ГТ-46 (ГТ-ВН), який закріплений безпосередньо на блоці озброєння та формує сигнал пропорційний значенню швидкості відхилення блоку озброєння. Сигнал пропорційний коливанням самої башти у вертикальній площині формується іншим гіротахометром ГТ-46К (ГТ-К), який називається компенсаційним [1, 2]. Сигнал пропорційний розвороту блоку озброєння відносно башти формує електромеханічний тахометр (ТГ). Сума цих двох сигналів ГТ-К та ТГ пропорційна швидкості зміни похибки стабілізації. Для отримання потрібних динамічних характеристик приводу ВН, а саме мінімальної похибки стабілізації та якості перехідного процесу використовується сигнал зворотного зв'язку по швидкості зміни похибки стабілізації, який отримується додаванням сигналу електромеханічного тахометра з сигналом компенсаційного гіротахометра, та сигнал місцевого зворотного зв'язку по струму привідного двигуна вертикального каналу ЕДМ20М, сформованого сенсором струму.

Процес налаштування передавальних коефіцієнтів ТГ та ГТ-К (сигнал ГТ-К формується в стабілізаторі тільки в динаміці при русі машини по пересіченій місцевості) в аналогових стабілізаторах в умовах башти, навіть технологічної, не кажучи про башту, яка вже встановлена на шасі виробу, дуже трудомісткий.

Наведемо методику налаштування передавальних коефіцієнтів ТГ та ГТ-К у аналоговому стабілізаторі 2Э36-1 [2]. Для того, щоб гіротахометр ГТ-К почав виробляти сигнали управління в умовах нерухомої технологічної башти, необхідно зняти гіротахометр ГТ-К з башти та встановити на блок озброєння на спеціально приварену для цього бонку. Спеціальним кабелем подати електричні сигнали з гіротахометра ГТ-К, змінивши при цьому в кабелі полярність сигналу ГТ-К, в адресу гіротахометра ГТ-ВН. Іншим спеціальним кабелем, який необхідно підключити до контрольного роз'єму Ш4 КПА блоку управління, на виводах 6 (ВН загальний) та 8 (сигнал ГТ+ТГ) контролювати постійну напругу на межі вимірювання 1,5В.

При виконанні цього налаштування необхідно:

- повернути вал резистора БГТ за (проти) годинниковою стрілкою на 25 обертів, а вал резистора ГН на 15 обертів;
- подати напругу на стабілізатор, при цьому виключити тумблера ГН та ВН на КР-25 (зняття силової напруги з приводів наведення);
- включити тумблер ПРИВОД на пульті оператора ПУ(О);
- обертаючи вал резистора БГТ за (проти) годинниковою стрілкою, необхідно компенсувати залишкову напругу гіротахметра ГТ-К до отримання нульового положення стрілки вимірювального приладу Ц4313;
- за допомогою ручного приводу по вертикальному каналу плавно задавати переміщення блоку озброєння в напрямку вгору з максимально можливою швидкістю та одночасно слідкувати за показами приладу;
- при необхідності обертайте вал резистора ГТ приводу ВН до отримання мінімальних показів приладу, але не більше 1 поділки шкали приладу;
- встановити ГТ-К на своє штатне місце у башті та відновити схему електричних з'єднань стабілізатора 2Є36-1 у зворотному порядку.

З наведеного вище виходить, що для лише налаштування передавальних коефіцієнтів ГТ-К та ТГ аналогового або цифрового стабілізатора в технологічному процесі обов'язково потрібна башта, навіть технологічна. Як проводити налаштування цих коефіцієнтів у складі стабілізатора без башти?

Експериментальна частина

Для цифрових стабілізаторів необхідне значення коефіцієнту налаштування встановлюється з пульта управління, що має три восьми-розрядних алфавітно-цифрових світлових лінійки для інформування оператора про режими роботи та вводу необхідних значень коефіцієнтів налаштування, тому часові викруткі не потрібні.

Для зменшення трудомісткості робіт в умовах складального цеху по виконанню перевірки, налаштуванню, в тому числі і передавальних коефіцієнтів, задачі замовнику стабілізатора всі операції проходять на стенді СТМ02[3] (рис. 2, 3). На поворотній платформі СТМ02 встановлюються всі чутливі елементи згідно рис. 4. Інші прилади стабілізатора та контрольно-вимірювальна апаратура розміщені на столі (рис. 3), тому немає необхідності встановлювати, а потім після виконання налаштування знімати ці прилади з башти з важкодоступних місць.

За допомогою механічних навантажувальних пристроїв (механічного типу за рахунок збільшення або зменшення сили тертя на гальмівному барабані) на стенді імітуються моменти опору обертанню аналогічні реальній башті.

Основна задача налаштування — налаштувати співвідношення по абсолютному значенню коефіцієнтів таким чином, щоб воно відповідало формулі:

$$|\cup_{ТГ} - \cup_{ГТ}| < 30 мВ, \quad (1)$$

де $\cup_{ТГ}$ - значення сигналу електромеханічного тахометра;

$\cup_{ГТ}$ - значення сигналу компенсаційного гіротахметра.

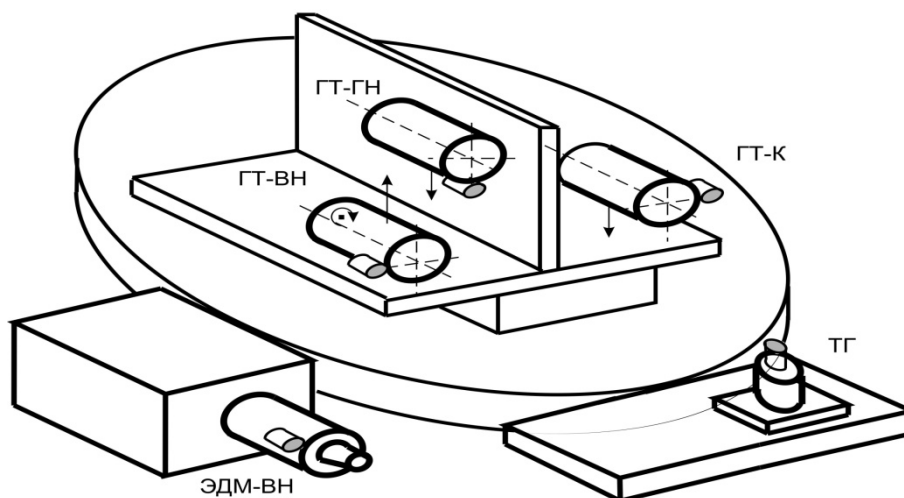


Рис. 4. Розміщення приладів на стенді при випробуваннях

Налаштування передавальних коефіцієнтів ГТ-К та ТГ на стенді проводиться при регулюванні вертикального каналу наведення проводиться у два етапи.

На першому етапі складається схема електричних з'єднань при цих налаштуваннях, що відповідає електричній схемі з'єднань у башті (рис. 5). При цьому кабель до гіротахметра ГТ-К не під'єднано.

Додатково на контрольний роз'єм блока управління БУ-Ш4 технологічним кабелем підключається контрольно-перевірочний пульт (КІП), на виводи якого виведено сигнали «ГТ+ТГ» та «ВН загальний». До цих контрольних виводів підключається цифровий вольтметр для вимірювання постійної напруги. Регулювальник вмикає стабілізатор в режимі «АВТ» (режим роботи стабілізатора, при якому швидкості наведення не більше $0,07^\circ/\text{с}$ та не менше $6^\circ/\text{с}$). З пульта управління стабілізатором ПУ поворотна платформа стенду розвертається на кут 60° за годинниковою стрілкою. Потім задається наведення поворотної платформи проти годинникової стрілки. Під час проходження платформи кута $(25\pm 5)^\circ$ регулювальник фіксує показання цифрового вольтметра, що є сигналом тахометра ($U_{ТГ}$).

На другому етапі для визначення сигналу компенсаційного гіротахометра необхідно вимкнути стабілізатор, від'єднати кабель від тахометра ТГ та підключити кабель до компенсаційного гіротахометра ГТ-К. Включити стабілізатор та через 3 хвилини за допомогою коефіцієнта БГТ ВН з пульта управління встановити мінімальні покази цифрового вольтметра (не більш $\pm 5\text{мВ}$). Розвернути стенд в положення 60° за годинниковою стрілкою. Повернути ручки пульта управління від себе до упору та в момент проходження стендом кута $(25\pm 5)^\circ$, регулювальник фіксує показання цифрового вольтметра, що є сигналом гіротахометра ($U_{ГТ}$), яке не повинно перевищувати покази $U_{ТГ}$ більш ніж на 10%, в іншому випадку, зменшуючи покази сигналу $U_{ГТ}$, за допомогою налаштувальних коефіцієнтів, повторюючи вказані вище обороти стенду, досягти заданого сигналу $U_{ГТ}$.

Отримані в результаті налаштування коефіцієнти заносяться в формуляр на стабілізатор. У разі збою у налаштуваннях стабілізатора у головному виробі, куди він встановлено, завжди можливо скористатись цими налаштувальними коефіцієнтами з формуляру і немає необхідності виконувати об'ємну роботу по додатковому налаштуванню поки не виникне потреба в заміні тахометра, гіротахометрів ГТ-К або вертикального гіротахометра ГТ-ВН.

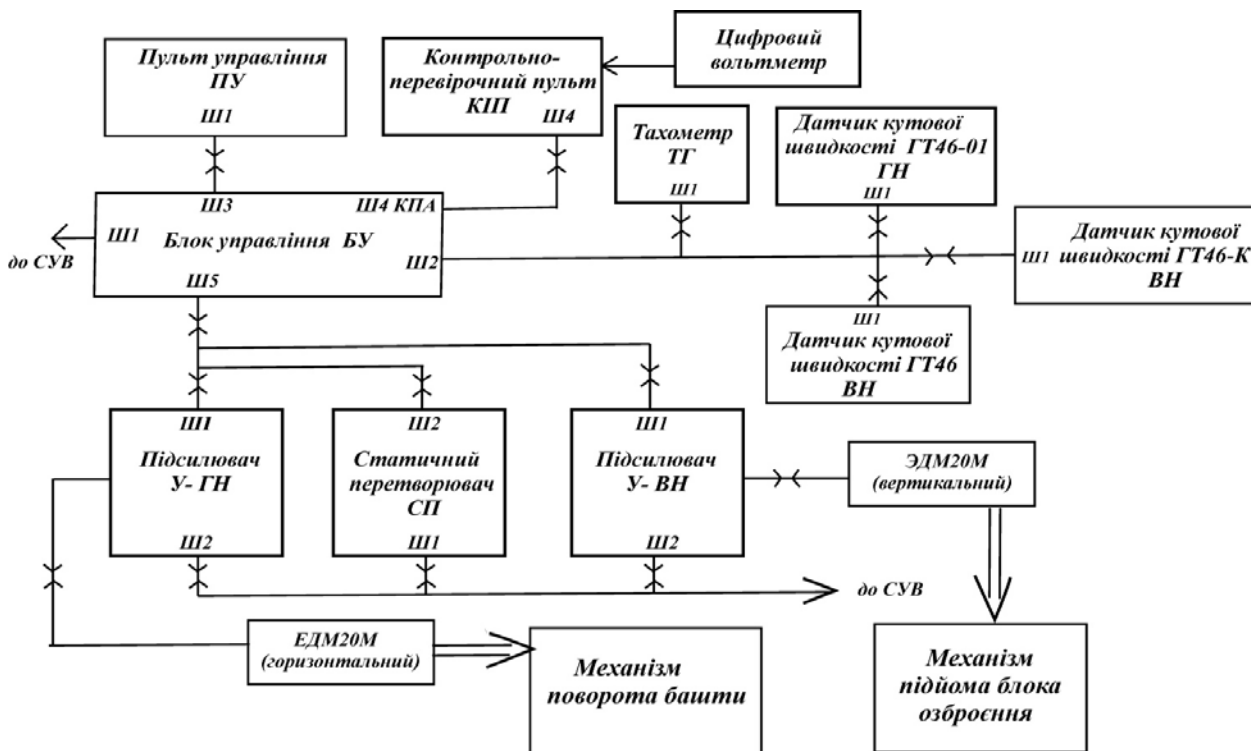


Рис. 5. Схема з'єднань приладів при налаштуваннях

Висновки

Розроблена та впроваджена у виробництво методика налаштування передавальних коефіцієнтів за допомогою стенда СТМ02 дозволила:

- виконувати весь процес налаштування стабілізатора, у тому числі і коефіцієнтів компенсаційного гіротахометра ГТ-К та електромеханічного тахометра, у складі стенда СТМ02 та відмовитись від застосування башти, навіть технологічної, при проведенні налаштування, перевірок, пред'явницьких та приймально-здавальних випробувань стабілізаторів озброєння;
- знизити приблизно у 30 разів собівартість лише одного робочого місця для проведення перевірок та налаштування стабілізаторів;
- знизити трудомісткість виконання робіт, пов'язаних з необхідністю перестановки приладового складу стабілізатора зі стенду СТМ02 на технологічну башту лише для налаштування коефіцієнтів компенсаційного гіротахометра та електромеханічного тахометра та назад на стенд після виконання робіт.

Методики перевірки, налаштування та проведення пред'явницьких та приймально-здавальних випробувань стабілізаторів озброєння на технологічному стенді можуть бути прийняті в подальших

розробках для інших типів стабілізаторів легкоброньованої техніки.

Література

Боевая машина пехоты BMP-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1. [Электронный ресурс]. – 1987. – Режим доступа : <http://armyman/info/books/id-443.html>

Стабилизаторы вооружения 2Э36 устройство и обслуживание [Электронный ресурс] / Кудрявцев А.М., Уласевич О.К., Жеглов В.Н., Гумилев В.Ю. – Рязань, 2013. – Режим доступа : <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.

Возняковський А.О. Стенд для проведення метрологічної атестації платформи при вимірюванні кутового прискорення / А.О. Возняковський // Вісник інженерної академії України. – 2016. – № 2. – С. 171–174.

References

1. Boevaya mashina pehoty BMP-2. Tehnicheskoe opisanie i instruksiya po ekspluatatsii. CHast 1. [Elektronnyiy resurs]. – 1987. – Rejim dostupa : <http://armyman/info/books/id-443.html>

2. Stabilizatoryi vooruzheniya 2E36 ustroystvo i obslujivanie [Elektronnyiy resurs] / Kudryavtsev A.M., Ulasevich O.K., Jeglov V.N., Gumilev V.YU. – Ryazan, 2013. – Rejim dostupa : <http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2014/04/KUDRYVTSEV-GUMELEV-SV-2E36pdf>.

3. Voznyakovskiy A.O. Stend dlya provedennya metrologichnoy atestatsii platformi pri vimiryuvanni kutovogo priskorennya / A.O. Voznyakovskiy // Visnik inzhenernoy akademii Ukraini. – 2016. – № 2. – С. 171–174.

Рецензія/Peer review : 19.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.

Рецензент: д. т. н., проф. В.П. Квасніков

ОЦІНЮВАННЯ ДОСТОВІРНОСТІ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПІГМЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІТОПЛАНКТОНУ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Здійснено математичне моделювання спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбиття шару водного середовища із частинками фітопланктону при зміні пігментних параметрів. Враховуючи вплив похибок на коефіцієнт дифузного відбиття на робочих довжинах хвиль спектральних каналів, оцінено помилки першого і другого роду, а також достовірність контролю у кожному із каналів засобу контролю. Достовірність багатопараметричного контролю пігментних параметрів мультиспектральним методом обчислена як добуток достовірностей у кожному із спектральних каналів. Робочі довжини хвиль і кількість каналів засобу мультиспектрального екологічного контролю визначаються спектральними характеристиками пігментів фітопланктону (хлорофілів та каротиноїдів), а також спектральними характеристиками джерела випромінювання і фотоматриці засобу контролю.

Ключові слова: мультиспектральний метод, водні середовища, спектральні характеристики, хлорофіл, фітопланктон.

S. M. KVATERNIUK

Vinnytsia National Technical University

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF MULTISPECTRAL ECOLOGICAL MONITORING OF PIGMENT PARAMETERS OF PHYTOPLANKTON IN AQUEOUS MEDIA

Mathematical modelling of the spectral characteristics of the coefficient of diffuse reflection of a layer of an aqueous medium with phytoplankton particles with a change in the pigment parameters is carried out. The functions of the probability density of errors occurring in the measuring channel of the multispectral environmental control are investigated. The dependence of the errors of the first and second kind and the reliability of the control of the pigment parameters of the phytoplankton on the threshold value of the diffuse reflection coefficient for a separate spectral channel of the monitoring instrument are analyzed. Taking into account the effect of errors on the coefficient of diffuse reflection on the working wavelengths of the spectral channels, the errors of the first and second kind, as well as the reliability of the control in each of the channels of the monitoring instrument, are estimated. The reliability of multivariate control of pigment parameters of multispectral methods was calculated as a product of reliability in each of the spectral channels. In order to obtain sufficient reliability of the control, it is necessary to select the correct spectral channels, when using which the overall reliability will not be less than the preset value. In particular, when using four channels with wavelengths of 530 nm, 590 nm, 620 nm and 730 nm in the multispectral environmental monitoring tool, the value of the reliability of the control of the ratio between chlorophyll a and total chlorophyll 0.939 is obtained, and when three channels with wavelengths of 450 nm, 470 nm and 660 nm, the reliability of the control of the ratio between carotenoids and total chlorophyll 0.972 was obtained. The working wavelengths and the number of channels of the multispectral environmental control are determined by the spectral characteristics of the phytoplankton pigments (chlorophylls and carotenoids), as well as the spectral characteristics of the radiation source and the photomatrix of the monitoring instrument.

Keywords: multispectral method, aqueous media, spectral characteristics, chlorophyll, phytoplankton.

Вступ

Для екологічного контролю водних об'єктів можна використовувати методи мультиспектрального контролю [1]. При цьому комплексний вплив забруднюючих речовин на водний об'єкт оцінюється за допомогою біоіндикації з використанням певних водних організмів, наприклад, фітопланктону чи вищих водних рослин [2]. Екотоксичність суміші невідомих забруднюючих речовин, що потрапили у водний об'єкт кількісно оцінюється за зміною параметрів біоіндикаторів. При використанні біоіндикації по фітопланктону екологічний контроль може здійснюватись за зміною таких пігментних параметрів, як співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом, або співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом. Метою роботи є оцінювання достовірності багатопараметричного мультиспектрального екологічного контролю пігментних параметрів фітопланктону у природних водних середовищах на основі результатів дослідження помилок першого та другого роду і достовірності контролю у окремих спектральних каналах.

Математичне моделювання спектральних характеристик коефіцієнту дифузного відбиття шару водного середовища із частинками фітопланктону при зміні пігментних параметрів

Використовуючи методіку математичного моделювання розсіювання світла у малокутовому наближенні [3, 4] розв'яжемо пряму задачу визначення спектральних характеристик природних водних середовищ для таких випадків зміни пігментних параметрів фітопланктону:

а) співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону $Chla/Chl$ у водному середовищі змінюється від 0,8 до 0,9; співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом $Carot/Chl = 0,27 \pm 0,027$; біомаса фітопланктону у водному середовищі $B = 17,7 \pm 1,77$ мг/л;

б) співвідношення між хлорофілом а та загальним хлорофілом фітопланктону у водному середовищі $Chla/Chl = 0,8 \pm 0,08$; співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом $Carot/Chl$ змінюється від 0,2 до 0,4; біомаса фітопланктону $B = 17,7 \pm 1,77$ мг/л.

При цьому параметри фітопланктону мають нормальний закон розподілу. Розраховані спектральні характеристики коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища при зміні пігментних

параметрів фітопланктону наведено на рис. 1.

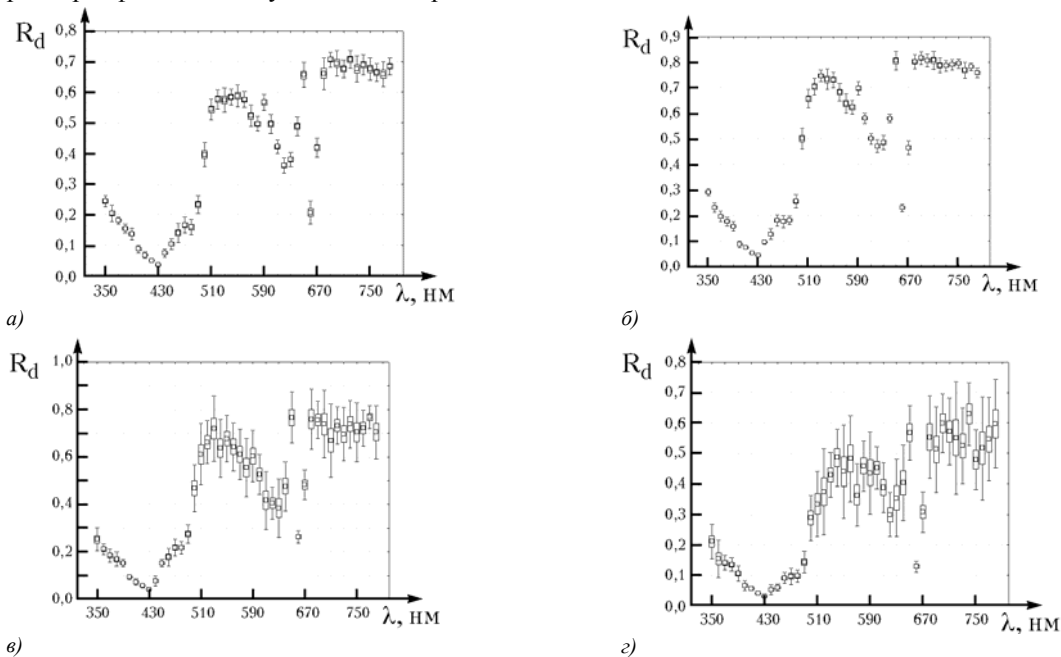


Рис. 1. Спектральні характеристики загального коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні природного водного середовища при зміні пігментних параметрів фітопланктону: **а)** Chla/Chl = 0,8 ; Carot/Chl = 0,27 ± 0,027 ; **б)** Chla/Chl = 0,9 ; Carot/Chl = 0,27 ± 0,027 ; **в)** Chla/Chl = 0,8 ± 0,08 ; Carot/Chl = 0,2 ; **г)** Chla/Chl = 0,8 ± 0,08 ; Carot/Chl = 0,4 .

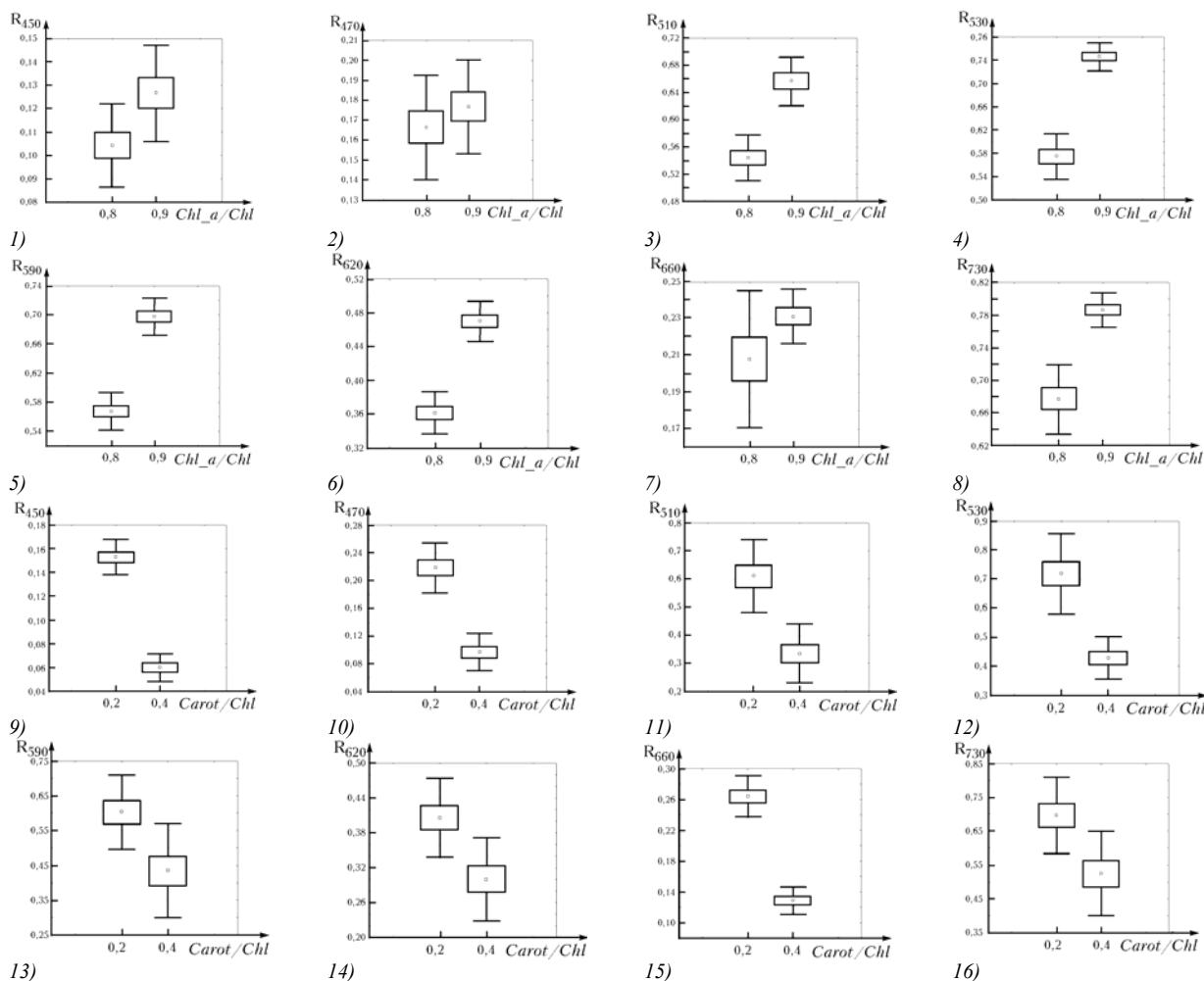


Рис. 2. Діаграми розмаху коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища при зміні співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом Chla/Chl (1–8) та каротиноїдами і загальним хлорофілом Carot/Chl (9–16)

Для прийняття рішення про стан об'єкту контролю за результатами мультиспектральних вимірювань у лабораторному макеті засобу мультиспектрального екологічного контролю здійснюється

вимірювання на довжинах хвиль, що відповідають характеристикам джерела випромінювання. Отримані при цьому діаграми розмаху коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища при зміні пігментних параметрів фітопланктону на цих довжинах хвиль наведено на рис. 2.

Розглянемо прийняття рішення про стан об'єкту контролю на довжині хвилі 510 нм. При цьому закон розподілу вимірюваної величини, тобто коефіцієнту дифузного відбиття на поверхні водного середовища при зміні співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом фітопланктону від 0,8 до 0,9 відповідає нормальному закону розподілу.

При використанні у засобі контролю ПЗЗ камери інструментальна складова похибки мультиспектральних вимірювань визначається двома складовими похибки, а саме похибкою, зумовленою наявністю шумів та випадкових завад у ПЗЗ камері та похибкою квантування пов'язаною з аналого-цифровим перетворенням. Функції щільності розподілу ймовірності похибок зумовлених наявністю шумів та випадкових завад у ПЗЗ камері та похибки квантування при використанні камери типу MDC140BW [5] на основі фотоматриці Sony ICX285AL проаналізовані у роботі [6].

Оцінювання достовірності мультиспектрального екологічного контролю пігментних параметрів фітопланктону у водному середовищі

Проаналізуємо достовірність контролю пігментних параметрів фітопланктону у водному середовищі за допомогою мультиспектрального методу. У результаті контролю пігментних параметрів фітопланктону на довжині хвилі 510 нм необхідно визначити чи перевищує вимірне значення коефіцієнту дифузного відбиття порогове значення, тобто $R_p = 0,604$, щоб розрізнити зразки з співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом 0,8 та 0,9. Порівняння результатів контролю та дійсного значення при опрацюванні результатів мультиспектральних вимірювань проводилось за методикою описаною у роботі [6]. При зміні порогового значення коефіцієнту дифузного відбиття ймовірність помилки першого та другого роду, а також достовірності контролю змінюється таким чином (див. рис. 3).

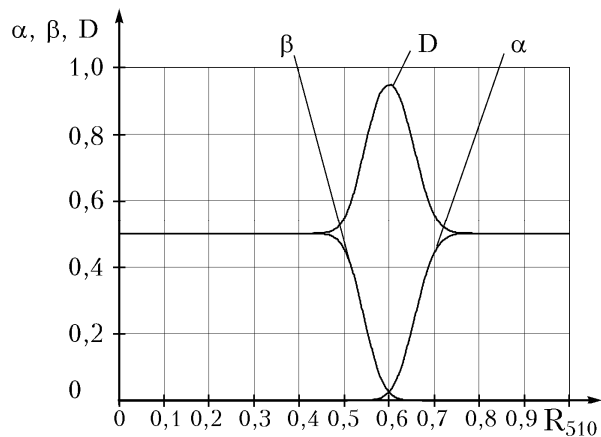


Рис. 3. Залежність помилок першого та другого роду та достовірності контролю співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом фітопланктону мультиспектральним методом

У табл. 1 наведено результати розрахунку помилок першого та другого роду та достовірності контролю пігментних параметрів фітопланктону мультиспектральним методом для інших спектральних каналів.

Таблиця 1

Результати розрахунку помилок першого та другого роду та достовірності контролю пігментних параметрів

Довжина хвилі, нм	R_1	R_2	α_i	β_i	D_i
Зміна співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом					
450	0,104370±0,017873	0,126655±0,020524	0,16	0,12	0,72
470	0,166366±0,026141	0,176787±0,023573	0,138	0,279	0,582
510	0,544284±0,033573	0,657209±0,035814	0,028	0,023	0,949
530	0,574745±0,039096	0,746518±0,023698	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,997
590	0,567362±0,025644	0,697673±0,025153	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	0,995
620	0,361308±0,024896	0,470147±0,024491	$5,35 \cdot 10^{-3}$	$7,55 \cdot 10^{-3}$	0,987
660	0,207780±0,037154	0,231058±0,014849	0,037	0,243	0,72
730	0,677084±0,042336	0,786341±0,020961	0,017	0,024	0,959
Зміна співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом					
450	0,153039±0,015293	0,059885±0,011417	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,9997
470	0,218642±0,035898	0,097021±0,026919	0,014	0,012	0,974
510	0,611659±0,129234	0,334817±0,106452	0,063	0,058	0,88
530	0,719055±0,137789	0,429759±0,073175	0,052	0,026	0,922
590	0,603915±0,107821	0,435920±0,134695	0,084	0,153	0,764
620	0,405982±0,067827	0,299850±0,072270	0,102	0,118	0,781
660	0,264222±0,026946	0,128925±0,018270	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,9987
730	0,696641±0,112632	0,525412±0,124805	0,097	0,137	0,766

При багатопараметричному мультиспектральному контролі пігментних параметрів фітопланктону достовірність буде визначатись добутком достовірностей обраних спектральних каналів. При використанні у засобі мультиспектрального екологічного контролю чотирьох каналів з довжинами хвиль 530, 590, 620 та 730 нм отримано значення достовірності багатопараметричного контролю співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом 0,939. При використанні у засобі мультиспектрального екологічного контролю трьох каналів з довжинами хвиль 450, 470 та 660 нм отримано значення достовірності багатопараметричного контролю співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом 0,972.

Висновки

При зміні пігментних параметрів фітопланктону у ході математичного моделювання отримано діаграми розмаху коефіцієнту дифузного відбиття на робочих довжинах хвиль спектральних каналів засобу контролю. Враховуючи вплив похибок на вимірювану величину, а саме коефіцієнту дифузного відбиття на робочих довжинах хвиль, оцінено помилки першого і другого роду, а також достовірність контролю у кожному із спектральних каналів. Для того, щоб отримати прийнятне значення достовірності контролю необхідно обрати такі спектральні канали, при використанні яких загальна достовірність не буде менша необхідного значення. Зокрема, при використанні чотирьох спектральних каналів (530, 590, 620, 730 нм) отримане значення достовірності контролю співвідношення між хлорофілом а і загальним хлорофілом склало 0,939, а при використанні трьох спектральних каналів (450, 470, 660 нм) отримано значення достовірності контролю співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом склало 0,972.

Література

1. Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ / С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 15–22
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal of the European Communities. – L 327, 22.12.2000. – 72 p.
3. Кватернюк С.М. Математичне моделювання переносу випромінювання у багат шарових неоднорідних біологічних середовищах для задач мультиспектрального вимірювального контролю та діагностики / С.М. Кватернюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2016. – № 2(32). – С. 57–63.
4. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк, В. В. Гончарук, О. І. Моканюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 50–56.
5. ScopeTek Product Manual. – SCOPETEK. – 2015. – 116 p.
6. Кватернюк С.М. Оцінювання достовірності мультиспектрального екологічного контролю біомаси фітопланктону у водних середовищах / С.М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 3. – С. 275–278.

References

1. Kvaterniuk S. M. Metod ta zasoby multyspektralnogo televiziynogo vymiryvalnogo kontrolyu stanu neodnorodnykh biologichnykh sere dovyskh / S. M. Kvaterniuk // Visnyk Vinnyczkogo politehnicznogo instytutu. – 2017. – №1. – P. 15–22.
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal of the European Communities. – L 327, 22.12.2000. – 72 p.
3. Kvaterniuk S. M. Matematychno modeliuвання perenosu vyprominiuvannya u bahatosharovykh neodnorodnykh biologichnykh sere dovyskhchakh dlia zadach multyspektralnoho vymiryvalnogo kontroliu ta diahnozyky / S. M. Kvaterniuk // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. – 2016. – №2(32). – P. 57–63.
4. Kvaterniuk S. M. Matematychno modeliuвання vplyvu parametriv okremykh shariv na spektralni kharakterystyky neodnorodnykh biotkany / V. G. Petruk, S. M. Kvaterniuk, O. Ye. Kvaterniuk et al. // Visnyk Vinnyczkogo politehnicznogo instytutu. – 2015. – №3. – P. 50–56.
5. ScopeTek Product Manual. – SCOPETEK. – 2015. – 116p.
6. Kvaterniuk S. M. Ocinyuvannya dostovirnosti multyspektralnogo ekologichnogo kontrolju biomasy fitoplanktonu u vodnykh sere dovyskhchakh / S. M. Kvaterniuk // Herald of Khmelnytskyi National University. Serija: Tekhnichni nauky. – 2018. – №3. – P. 275–278.

Рецензія/Peer review : 20.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кучерук В.Ю.

СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ КЕРОВАНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ЗІГ-ГЕНЕРАТОРА

Вирішення актуальної проблеми визначення частотних характеристик пристроїв та ліній зв'язку полягає у розробці нових методів, що допоможуть покращити точність таких панорамних вимірювань та забезпечити якісне проведення усіх вимірювально-технологічних операцій. Дана робота знайомить з новим способом визначення частоти керованого генератора на ЗІГ-резонаторі. Схема визначення частоти керованого генератора складається з блоку перестройки, обчислювального блоку, власно керованого генератора, стробоскопічного змішувача, фільтра нижніх частот, формувача міток, перемикача, першого і другого кварцових опорних генераторів, третього опорного діапазонного генератора.

Ключові слова: панорамний прилад, керований генератор, ЗІГ-резонатор, змішувач, кварцовий опорний генератор, частотний синтезатор, координатна мітка, вимірювальна мітка.

S. P. KONONOV, M. A. HRYHORENKO
Vinnytsia National Technical University

THE METHOD OF DETERMINING THE FREQUENCY OF A CONTROLLED OSCILLATOR ON THE BASIS OF THE ZIG-GENERATOR

Solving the actual problem due to determination of frequency characteristics of devices and communication lines is developing of new methods that will help to improve the accuracy of such panoramic measurements and ensure the high quality of all measuring and technical operations. This work introduces a new way to determine the frequency of measuring generator on ZIG-resonator. There are no loop control in generator. It's doesn't cause increasing of the level of his phase noise, and temperature frequency instability slightly affects the accuracy of measurements. There is proposing structural scheme that implements a new way to determine the frequency of measuring generator. This work is relevant at the present stage of development of electronic and telecommunication technologies, because it allows to represent to a wide generally a new algorithm determine the frequency of measuring generator. Such approach will improve characteristics and quality of measuring panoramic devices, which in turn optimizes and speed up a process of researching, development and operation of electronic and telecommunications equipment devices and systems. Scheme that determine the frequency of measuring generator consists of the changing block, computational block, measuring generator, stroboscopic mixer, low pass filter, marks maker, switch, the first and second quartz supporting generators, the third supporting band generator. Measuring mark is forming with any frequency in the oscillation band, during the full cycle of the scheme work. As a result, error of definition frequency in the panoramic device will be such or less, as in the best samples of frequency characteristics measuring devices. For example, 0,1 - 0,5 % in the serial device P4-MWM-20 developed by MWM LAB (Belarus). High linearity depending frequency of ZIG-resonator generation from the control current allows, using piecewise linear approximation, to show information about the frequency in the point of the cursor location in the device's monitor.

Keywords: panoramic device, measuring generator, ZIG-resonator, mixer, quartz reference oscillator, frequency synthesizer, coordinate marks, measuring marks

Вступ

Під час визначення параметрів пристроїв та ліній зв'язку важливо знати їх частотні характеристики, знаходження яких є відносно складною операцією.

На допомогу приходять панорамні радіовимірювальні прилади. Узагальнено вони складаються з вимірювального каналу, керованого генератора та обчислювального блоку. Перші два безпосередньо з'єднані з об'єктом, що досліджується. На виході обчислювального блоку відтворюються необхідні параметри і характеристики, достовірність яких в значній мірі залежить від точності формування частотної осі. Актуальною є задача підвищення точності визначення частоти керованого генератора.

Керований генератор в режимі сканування працює в широкому діапазоні частот і може бути побудований за різними способами. Генератор будується на основі частотного синтезатора з петлею ФАПЧ або блоків прямого цифрового і аналогового синтезу. Безпосередньо в якості вузла генерації використовуються схеми на варикапах, керовані напругою, або ЗІГ(залізо-ітрієвий гранат)-резонатори, керовані струмом [1].

До переваг керованого генератора на ЗІГ-резонаторах можна віднести велику кратність перебудови частоти (до декади), високу лінійність залежності частоти генерації від струму керування, низький рівень фазових шумів. Недоліком є низька температурна стабільність частоти та інерційність її зміни. Остання, у випадку коли у керованому генераторі застосовуються зворотні зв'язки регулювання, наприклад ФАПЧ і ЧАПЧ, впливає на швидкодію в цілому панорамних вимірювань. Крім того, наявність в схемі ФАПЧ і ЧАПЧ з опорними генераторами призводить до зростання фазових шумів керованого генератора [2, 3].

Метою роботи є спроба запропонувати новий спосіб визначення частоти керованого генератора на ЗІГ-резонаторі, в якому будуть відсутні петлі регулювання, не буде збільшений рівень фазових шумів, а температурна нестабільність частоти суттєво не впливатиме на точність вимірювань.

Реалізація за новим способом керованого генератора разом зі схемою визначення його частоти спростить конструкцію, зменшить вартість панорамного приладу.

Матеріал даної наукової роботи може бути цікавий для спеціалістів, які займаються розробкою керованих генераторів для панорамних приладів, наприклад, фірми «Micro Lambda Wireless» (USA) та інших подібних організацій.

Принцип роботи схеми визначення частоти

Запропонована схема визначення частоти керованого генератора наведена на рис. 1.

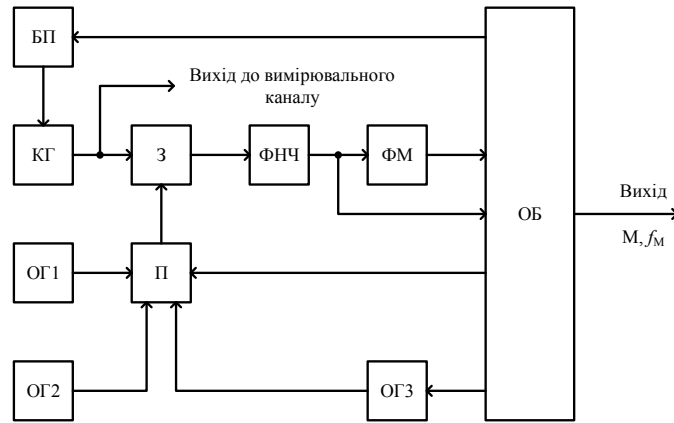


Рис. 1. Схема визначення частоти керованого генератора

Пилкоподібну напругу блок перестройки (БП) починає формувати з приходом на його вхід імпульсів $U_{ОБ}$ від обчислювального блоку (ОБ) (рис. 2, а). Частота $f_{ВГ}$ вихідної напруги керованого генератора (КГ), підключеного до першого входу змішувача (З), змінюється під час прямого ходу розгортки БП за лінійним законом (рис. 2, б). На другий вхід змішувача З через ключ (К) подається напруга у вигляді коротких імпульсів з першого (ОГ1) або другого (ОГ2), або третього (ОГ3) опорних генераторів. Гармоніки вихідної напруги опорних генераторів розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот керованого генератора з кроком f_1, f_2, f_3 , відповідно.

Під час першого періоду розгортання частоти ВГ до змішувача З приєднаний генератор ОГ1 з частотою f_1 . При цьому на виході змішувача З спостерігаються "нульові биття", за якими формувач міток (ФМ) створює на вході ОБ імпульси міток тривалістю 2τ з частотним кроком f_1 (рис. 2, в). Часове положення цих міток запам'ятовується в ОБ. Так в часі формуються координатні мітки.

Назва "нульові биття" вказує на появу низькочастотної напруги на виході змішувача З з переходом її частоти через нуль в моменти часу, коли $f_{ВГ} = if_i$, де $i=1, 2, \dots, n, n+1, \dots, n_{МАКС}$ – номер гармоніки генератора ОГ1. Ця низькочастотна напруга потрапляє на вхід ФМ, який складається з послідовно з'єднаних ФНЧ, детектора і компаратора (рис. 3). На виході останнього з'являються імпульси міток.

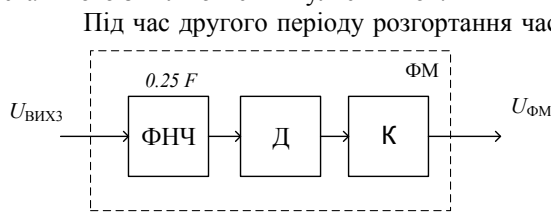


Рис. 3. Формувач міток

Під час другого періоду розгортання частоти генератора ВГ до змішувача З приєднаний генератор ОГ2 з частотою $f_2 = f_1 + F$, де F – частота зсуву, $f_{МАКС}$ – максимальна частота керованого генератора, $n_{МАКС}$ – максимальний номер гармоніки ОГ1.

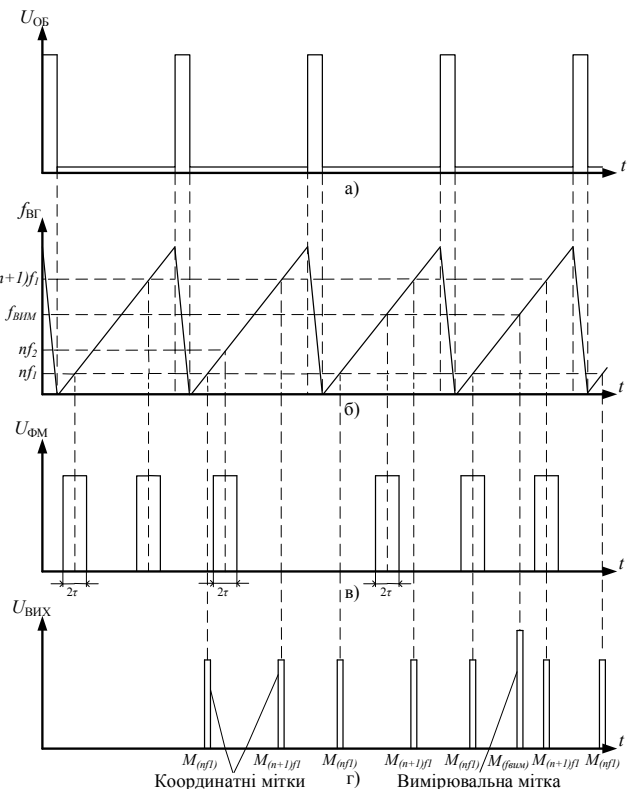


Рис. 2. Часові характеристики сигналів

Для нормальної роботи схеми (рис.1) необхідно, щоб ФНЧ (рис. 3) мав смугу пропускання $0,25F$. Для уникнення впливу перехідних процесів у вузькосмуговому ФНЧ на формування координатних, а пізніше і виміральної мітки треба правильно вибрати швидкість зміни частоти ВГ, іншими словами,

$$f_1 + F$$

Перед ФМ встановлений ФНЧ зі смугою пропускання $\frac{f_1 + F}{2}$. На виході цього фільтра виділяється напруга, частота якої змінюється в часі за трикутним законом. В момент появи координатної мітки (позначено точкою) частота на виході ФНЧ зменшується (рис. 4,а) або збільшується (рис. 4,б) залежно від

значення частоти генератора ВГ.

При появі першої координатної мітки ОБ визначає в двох послідовних часових інтервалах тривалістю τ кількість квазіперіодів напруги з виходу ФНЧ S_1, S_2 (рис. 2, в, рис. 5, а, б для випадку $S_1 > S_2$). В ОБ розраховується частота ВГ f_{mn} в момент появи першої координатної мітки за формулами:

$$f_{mn} = n f_1 = \frac{S_1 + S_2}{2 \tau F} \cdot f_1, \text{ якщо } S_1 > S_2;$$

$$f_{mn} = n f_1 = \frac{F + S_1 + S_2}{F} \cdot f_1, \text{ якщо } S_1 < S_2;$$

де n – номер гармоніки генератора ОГ1 з частотою f_1 , $\frac{S_1 + S_2}{2 \tau}$ – частота, яка відповідає

середині часового інтервалу, визначається в ОБ. Номер гармоніки n в ході обчислень заокруглюється до найближчого цілого числа, тим самим підвищується точність визначення частоти координатних міток [4].

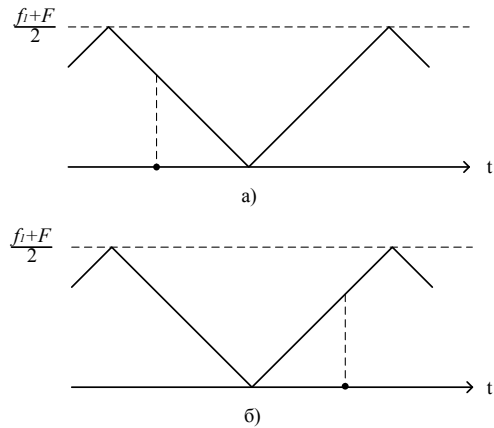


Рис. 4. Частота на виході ФНЧ в момент появи координатної мітки

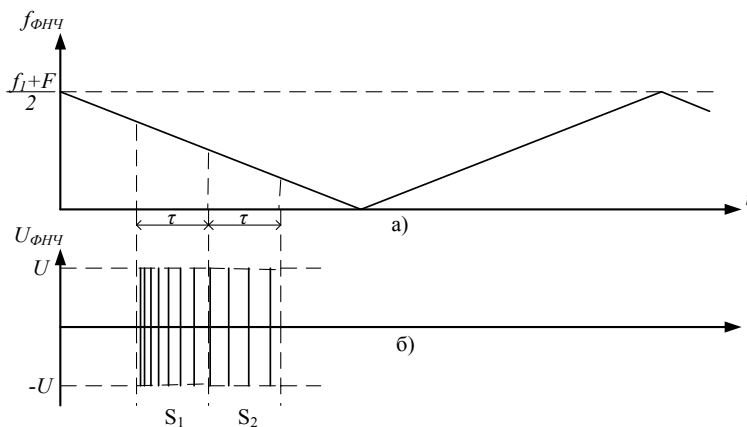


Рис. 5. Зміна в часі частоти і напруги на виході ФНЧ

ОБ за відомим номером гармоніки n генератора ОГ1 визначає частоти всіх координатних міток в смузі гойдання ВГ.

Під час третього періоду розгортання частоти ВГ формується вимірювальна мітка (рис. 2, в), яка відповідає довільній частоті $f_{вим}$ ВГ в межах його робочого діапазону. Частота $f_{вим}$ визначається оператором, який працює з панорамним приладом. До змішувача З приєднується генератор ОГ3, частота якого f_3 задається кодом керування від ОБ. Генератор ОГ3 діапазонний і працює в межах від f_1 до $2f_1$. Його частота знаходиться з виразу:

$$f_3 = f_1 + \frac{f_{вим} - n_{вим} f_1}{n_{вим}}$$

де $n_{вим}$ – номер гармоніки генератора ОГ1, який відповідає частоті координатної мітки попередньої вимірювальної.

Генератор ОГ3 будується на основі частотного синтезатора з петлею ФАПЧ (рис. 6). До його складу входять: кварцовий генератор (КГ), який визначає крок перебудови за частотою; фазовий детектор (ФД); ФНЧ, від якого залежить інерційність зміни частоти; генератор на варикапі, керований напругою (ГКН); подільник частоти за змінним коефіцієнтом ділення (ПЗКП), який керується від ОБ і визначає частоту генератора ОГ3.

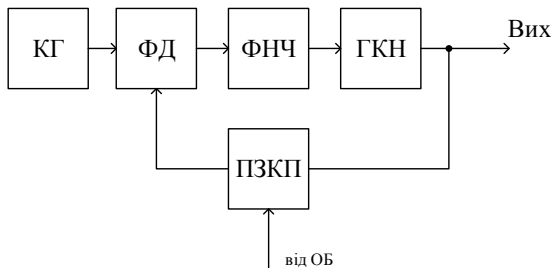


Рис. 6. Третій опорний генератор

описується виразом:

З четвертого і далі періоду розгортання частоти ВГ на виході ОБ формуються короткі імпульси координатних і вимірювальної міток M (рис. 2, г).

Алгоритм роботи ОБ можна доповнити такою сервісною функцією: оператор панорамного приладу курсором на моніторі визначає в будь-якій точці отриманої характеристики частоту. Для цього, використовуємо метод кусково-лінійної апроксимації. Якщо дві координатні мітки вважати опорними точками з координатами x_1, y_1 і x_2, y_2 прямої лінії, то її рівняння

$$y = \frac{f_2 - f_1}{x_2 - x_1} \cdot x + \frac{x_2 f_1 - x_1 f_2}{x_2 - x_1},$$

Для нашого випадку у відповідає частоті $f_{\text{ВГ}}$, x_1 відповідає частоті координатної мітки $n f_1$, а $x_2 - (n+1)f_1$. Після перетворення отримаємо:

$$f = \frac{f_1}{x_2 - x_1} \cdot [x + n x_2 - (n+1)x_1],$$

де x – координата курсору по осі частот, f – частота, яка відповідає положенню курсору на моніторі панорамного приладу.

Висновки

1. Запропонована схема визначення частоти керованого генератора панорамного приладу. Керуваного генератор на ЗІГ-резонаторі не охоплено зворотними зв'язками додаткових регулювань. Він керується лише кодом від обчислювального блоку, від якого залежить струм в котушці. В результаті, вихідна напруга генератора має мінімальний рівень фазового шуму.

Можливі інші способи побудови керованого генератора, наприклад, на основі коливального контуру з варикапом.

2. Використання в якості змішувача НВЧ стробоскопічної конструкції піднімає верхню робочу частоту панорамного приладу до 20 ГГц і вище.

3. Відносна частотна нестабільність опорних генераторів на кварцових резонаторах 10^{-6} і краще забезпечує високу точність визначення частоти керованого генератора, температурна нестабільність якого впливає тільки на часове положення міток на моніторі приладу.

4. В схемі визначення частоти формуються координатні мітки з відомими частотним кроком і абсолютною частотою. Для зменшення кроку схему можна доповнити вузлами додаткового перетворення [5].

5. Крім координатних міток на екрані монітора оператором може бути сформована вимірювальна мітка з будь-якою частотою, точність встановлення якої залежить від малого кроку, меншого за 1 кГц, зміни частоти третього опорного генератора. В результаті, похибка визначення частоти в панорамному приладі буде такою або меншою, як і в кращих зразках вимірювачів частотних характеристик, наприклад, (0,1-0,5)% в серійному приладі Р4-МВМ-20 виробництва фірми MWM LAB (Білорусь).

6. Висока лінійність залежності частоти генерації ЗІГ-резонатора від струму керування дозволяє, використавши кусково-лінійну апроксимацію, подавати на моніторі приладу інформацію з допустимою похибкою про частоту в точці розташування курсору.

Література

1. Кандырин Н.П. ГУН или ЖИГ ? Выбор генераторов при проектировании СВЧ синтезаторов с ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Системы обработки информации. – X. : ХУ ПС, 2015. – Вип. 8 (133). – С. 25–30.

2. Ченакин А. Проблема выбора при проектировании высококачественного синтезатора с ФАПЧ / А. Ченакин // Электроника: наука, технология, бизнес. – РИЦ “Техносфера”, 2012. – Вип. 6 (00120). – С. 118–122.

3. Кувшинов В. ЖИГ генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless / В. Кувшинов // Компоненты и технологии. – X. : ХУ ПС, 2015. – Вип. 9. – С. 34–38.

4. Кононов С.П. Влияние фильтров на точность измерения частоты свип-генератора стробоскопическим методом / С.П. Кононов, С.М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2005. – № 4, ч. 1, т. 1(68). – С. 160–163.

5. Кононов С.П. Калибровка частотной шкалы в панорамных измерителях характеристик устройств радиосвязи / С.П. Кононов, Д.С. Полуденко, О.С. Полуденко, Г.Л. Антонюк // ООО “НАУЧНЫЙ МИР”. – 2015. – Т. 4, Вип. 2 (39). – С. 35–45.

References

1. Kandyrin N.P. VCO or YIG? The choice of generators in the design of microwave synthesizers with PLL / N.P. Kandyrin // System of information boxes. - X. : HU PS, 2015. - Vip. 8 (133). - P. 25-30.

2. Chenakin A. The problem of choice when designing a high-quality synthesizer with PLL / A. Chekanin // Electronics: science, technology, business. - RIC "Technosphere", 2012. - Vip. 6 (00120). - P. 118-122.

3. Kuvshinov V. YIG generators and frequency synthesizers of the company Micro Lambda Wireless / V. Kuvshinov // Components and technologies. - X. : HU PS, 2015. - Vip. 9. - P. 34-38.

4. Kononov SP Influence of filters on the accuracy of measuring the frequency of a sweep-generator by a stroboscopic method / SP Kononov, SM Quaternyuk // Zh. "Bulletin of Khmelnytsky National University", Khmelnytsky, 2005, No. 4, p.1, t.1 (68) p.160-163

5. Kononov S.P. Calibration of the frequency scale in panoramic meters of the characteristics of radio communication devices. / SP Kononov, D.S. Poludenko, O.S. Poludenko, G.L. Antonyuk // LLC "SCIENTIFIC WORLD". -2015. - Vol. 4, Vip. 2 (39). - P. 35-45.

Рецензія/Peer review : 18.6.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Осадчук А.В.

УДК 621.395:004

І.Ю. ХУДЕЦЬКИЙ, Ю.В. АНТОНОВА-РАФІ, А.В. ШЕВЧУК
 Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут ім. І. Сікорського»

МЕТОДИКИ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ СЕРЦЕВОГО РИТМУ ДЛЯ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

Проаналізовані методики застосування математичного аналізу серцевого ритму для оцінки функціонального стану людини та визначено як оптимальну методику застосування вейвлет-аналізу для оцінки функціонального стану організму людини з застосуванням сучасних безпроводних медичних гаджетів. Об'єктивна оцінка роботи серця є інтегративною характеристикою, що дозволяє комплексно та системно оцінити функціональний стан здоров'я людини в цілому. Аналіз варіабельності серцевого ритму – це технологія вивчення і оцінки вегетативної регуляції фізіологічних функцій, що пов'язана з використанням програмно-апаратних комплексів, які повинні забезпечити надійне зняття інформації, надійне розпізнавання та вимірювання кардіоінтервалів з побудовою тимчасових динамічних рядів і застосування до них стандартизованих математичних процедур аналізу. В даний час актуальною є розробка прогностичних моделей на основі оцінки поточного функціонального стану організму за допомогою автоматизованих комплексів для аналізу та візуалізації RR-інтервального ряду.

Ключові слова: вейвлет-аналіз, кардіоінтервалографія, ритмограма, спектральний аналіз.

IGOR KHUDETSKYI, JULIA ANTONOVA-RAFI, ANASTASIA SHEVCHUK
 National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHODS OF THE APPLICATION OF MATHEMATICAL ANALYSIS OF HEART RHYTHM TO ASSESS THE FUNCTIONAL STATE OF THE HUMAN BODY

An objective evaluation of the heart's work by an integrative characteristic that allows a complex and systemic assessment of the functional state of human health as a whole. The analysis of heart rate variability is a technology for studying and evaluating the vegetative regulation of physiological functions associated with the use of software and hardware complexes that must provide reliable information retrieval, reliable recognition and measurement of cardio intervals with the construction of temporary dynamic series and the application of standardized mathematical analysis procedures to them. At present, development of prognostic models based on the evaluation of the current functional state of the organism using automated complexes for analysis and visualization of the RR-interval series is actual. HRV analysis is associated with the use of hardware and software systems that must ensure reliable information retrieval, reliable recognition and measurement of cardio intervals with the construction of temporary dynamic series and the application of standardized mathematical analysis procedures to them. The use of the wavelet analysis apparatus for processing medical information is the most promising in comparison with other methods. It is his use that allows us to identify key diagnostic features and obtain a frequency-time characteristic of the signal under study. We propose the use of modern hardware and software systems based on the use of wireless technologies that could contain both long-term and short-term recording modes and could conduct a monitoring analysis of the rhetoric of dispersion. If they go beyond the limits of the norm, they could provide the transfer of information to the server for the coincidence of data and further dispatch to a medical institution for detailed analysis.

Keywords: wavelet analysis, cardiointervalography, rhythmogram, spectral analysis.

Постановка проблеми

Визначення стану організму людини в реальному режимі часу без обмеження можливості її звичайної повсякденної діяльності є важливим завданням для сучасної медицини. Це в свою чергу потребує вирішення ряду питань. Перш за все це вибір максимально інформативного показника функціонального стану. Інше питання – це можливість реєстрації цього показника з застосуванням носимих безпроводних гаджетів.

Цим вимогам відповідають показники варіабельності серцевого ритму (ВСР). В даний час ритм серця розглядається не тільки як показник власної функції синоатріального вузла як водія ритму, але в більшій мірі як інтегральний маркер стану безлічі систем, що забезпечують гомеостаз організму. По структурі серцевого ритму, закладеного в послідовності RR-інтервалів, можна судити про адаптаційні механізми, рівень функціонування вегетативної підсистеми організму, що дозволяє виявити реакцію організму людини на стрес, а також провести експрес-аналіз поточного стану. Дана методика відповідає і іншій вимозі – створенню неінвазивної безпроводної носимої апаратури, що дозволяє отримувати необхідну інформацію не обмежуючи пацієнта в його повсякденній діяльності. З огляду на широкі перспективи розвитку методу, тим більше важливо забезпечити його стандартизацію і порівнянність даних, одержуваних різними дослідниками [1].

Аналіз останніх джерел

Виділяють наступні групи методів оцінки варіабельності серцевого ритму:

- методи часової області - спираються на статистичні методи та направлені на дослідження загальної варіабельності;
- методи частотної області - дослідження періодичних складових ВСР;
- інтегральні показники ВСР (відносять автокореляційний аналіз і кореляційну ритмографію).

Для дослідження феномена регуляції серцевого ритму анатомічними структурами застосовується аналіз ВСР, або метод кардіоінтервалографії. Суть методики кардіоінтервалографії полягає в наступному.

Ресструється електрокардіограма (ЕКГ) в трьох основних відведеннях (ліва рука – права рука, ліва рука – ліва нога, права рука – ліва нога). За отриманою ЕКГ визначаються інтервали між сусідніми R-зубцями, які називаються RR-інтервали, або кардіоінтервали. Для реалізації аналізу варіабельності серцевого ритму необхідно від 100 (для лінійного аналізу) до 3000 (для нелінійного аналізу) кардіоінтервалів. Далі проводять статистичний, гістографічний, кореляційний і спектральний аналіз ритмограм.

Статистичні методи засновані на вимірі NN-інтервалів, а також на порівнянні показників. Вони дають кількісну оцінку варіабельності. Пацієнт після обстеження отримує кардіоінтервалограму, яка представляє собою сукупність RR-інтервалів, які відображаються один за одним [2].

Метою роботи є дослідження існуючих методик оцінки функціонального стану організму людини та вибір найбільш функціонально значимої для застосування із сучасними безпроводними медичними гаджетами.

Виклад основного матеріалу

Для аналізу кардіоінтервалограми використовуються наступні критерії.

- SDNN – стандартне відхилення всіх NN-інтервалів. Відображає всі періодичні складові варіабельності за час запису, тобто є сумарним показником ВСР;
- RMSSD – дані оцінки співвідношення NN-інтервалів;
- pNN50 – цей критерій представляє відношення NN-інтервалів, які відрізняються один від одного більш ніж на 50 мс, із загальним числом NN-інтервалів.

Для аналізу ВСР використовуються також геометричні методи. Суть полягає в отриманні закону розподілу кардіоінтервалів як випадкових величин. Розподіл тривалості кардіоінтервалів відображають на гістограмі.

У стресових ситуаціях, а також при патологічних станах діаграма буде з гострою вершиною (ексцесивна). Асиметрична діаграма спостерігається при перехідних процесах, порушенні стаціонарного процесу. Багатовершинна діаграма свідчить про несинусовий ритм (екстрасистолії, миготливої аритмії).

Геометричні методи дозволяють оцінити варіабельність серцевого ритму за допомогою наступних параметрів: моди, амплітуди моди і варіаційного розмаху. Мода (M_o) відповідає кількості RR-інтервалів, які зустрічаються найбільш часто, отже, дозволяють оцінити реальний стан систем регуляції пацієнта. Амплітуда моди ($A(M_o)$) показує частку інтервалів, які відповідають значенням моди. Цей параметр відображає стабілізуючий ефект централізації управління серцевим ритмом. Варіаційний розмах (VAR) відповідає різниці між тривалістю найбільшого і найменшого інтервалів. Для того, щоб оцінити ступінь адаптації серцево-судинної системи до різних факторів і подивитися ступінь регуляції даних процесів використовуються додаткові параметри, які розраховуються. До них відносять індекс вегетативної рівноваги (ІВР), показник адекватності процесів регуляції (ПАПР), індекс напруги регуляторних систем (ІН), вегетативний показник ритму (ВІР). Індекс вегетативної рівноваги показує співвідношення впливу на серцево-судинну систему симпатичної і парасимпатичної систем. Вегетативний показник ритму відображає баланс регуляції роботи серцево-судинної системи з боку симпатичного і парасимпатичного відділу вегетативної нервової системи. Індекс напруги вказує на ступінь впливу нервової системи на роботу серця.

Автокореляційний аналіз використовується для оцінки серцевого ритму як випадкового процесу. Являє собою якісний аналіз, за даними якого можна судити про вплив на автономну систему серця центральної ланки.

Кореляційна ритмографія або скатерографія – це графічне відображення розподілу кардіоінтервалів (попереднього і наступного) в двомірній координатній площині. При цьому по осі абсцис відкладається величина $R-R_i$, а по осі ординат – величина $R-R_i + 1$. Графік і область точок, отриманих таким чином (плями Пуанкаре або Лоренца), називається кореляційною ритмограмою, або скатерограмою. Цей спосіб оцінки ВСР відноситься до методів нелінійного аналізу та особливо для розпізнавання і аналізу серцевих аритмій. На ритмограмі виділяють «хмару» – еліпс, який відповідає стандартному відхиленню всіх NN-інтервалів. Завдяки цьому методу можна оцінити активність симпатичної вегетативної нервової системи по відношенню до серця. У здорової людини на скатерограмі еліпс буде витягнутий уздовж бісектриси [3].

Застосування методу спектрального аналізу ВСР дозволяє кількісно оцінити вплив на роботу серця різних регуляторних систем. Виділяють три основних спектральних компонента, які відповідають коливанням ритму серця різної періодичності – високочастотні (High Frequency – HF), низькочастотні (Low Frequency – LF) і дуже низькочастотні (Very Low Frequency – VLF) компоненти, які використовуються при короткочасному записі ЕКГ (табл. 1).

Таблиця 1

Компоненти спектру

Назва компонентів спектру	Частотний діапазон, Гц	Період, с
HF	0,4 – 0,15	2,5 – 6,6
LF	0,15 – 0,04	6,6 – 25,0
VLF	0,04 – 0,015	25,0 – 66,0
ULF	Менше 0,015	Більше 66,0

Для тривалих записів використовують також додаткові компоненти – ультранизкочастотні (Ultra Low Frequency (ULF)). HF компонент пов'язаний з дихальними рухами і відображає вплив на роботу серця блукаючого нерва. LF компонент характеризує вплив на серцевий ритм як симпатичного відділу, так і парасимпатичного. VLF і ULF компоненти відображають дію різних факторів, до яких відносять, наприклад, судинний тонус, систему терморегуляції та ін. Важливими параметрами є також TF – загальна потужність спектра, індекс централізації IC (обчислюється за формулою $(HF + LF) / VLF$) і індекс вагосимпатичних взаємодій LF / HF. TF дозволяє оцінити сумарну активність впливів на ритм серця вегетативної нервової системи. LF / HF характеризує баланс впливу на серце парасимпатичного і симпатичного відділів.

При обробці сигналів зі змінними частотно-часовими параметрами найбільш перспективним у наш час є використання вейвлет-аналізу, а саме вейвлет-перетворення, яке має безсумнівні переваги перед іншими. Перетворення Фур'є, яке часто використовується, представляє сигнал, заданий в часовій області у вигляді розкладання за ортогональними базисними функціями (синусам і косинусам), виділяючи частотні компоненти. Недолік перетворення Фур'є полягає в тому, що частотні компоненти не можуть бути локалізовані в часі. Це обумовлює його застосовність тільки до аналізу стаціонарних сигналів.

Більшість медичних сигналів має складні частотно-часові характеристики. Часто такі сигнали складаються з близьких за часом, короткоживучих високочастотних компонентів і довготривалих, близьких за частотою до низькочастотних компонентів [4].

Для аналізу таких сигналів потрібен метод, що забезпечує хороше дозвіл по частоті і по часу. Перше потрібно для локалізації низькочастотних складових, друге – для дозволу компонентів високої частоти. У разі вейвлет-перетворення нестационарний сигнал аналізується шляхом розкладання по базисних функціях, отриманим з деякого прототипу шляхом стиснень, розтягнень і зсувів. Розрізняють дискретне і безперервне Вейвлет-перетворення, які можна застосовувати як для безперервних, так і для дискретних сигналів. Сигнал аналізується шляхом розкладання по базисних функціях, отриманим з деякого прототипу. Функція-прототип називається (материнським) вейвлетом.

Метод моніторингу ЕКГ є одним з найважливіших неінвазивних інструментів діагностики серцевих захворювань. В наш час значного поширення та вдосконалення набула телекомунікаційна інфраструктура. Представлена велика кількість підходів, спрямованих на розвиток телеметричних кардіологічних пристроїв. Телеметричні пристрої ЕКГ дозволяють легко і швидко контролювати ЕКГ пацієнтів з підозрою на серцеві дисфункції. Сучасні системи аналізу ВСР дозволяють отримувати зображення спектрограм через певні проміжки часу для оцінки динаміки компонентів спектра під час дослідження [5].

В наш час розроблена велика кількість апаратно-програмних комплексів для реалізації методики кардіоінтервалографії («Варікард», «Віта-Ритм», «ВНС-Ритм», «ВНС-Віта» і «ВНС-Спектр», «Нейрософт», «Карди»). Враховуючи сучасні реалії поряд із якістю одержуваних результатів та функціональними можливостями апаратів одним із важливих аспектів є їх ціна. Всі зазначені апаратно-програмні комплекси працюють спільно з комп'ютером і забезпечують формування динамічних рядів кардіоінтервалів з частотою дискретизації електрокардіографічного сигналу до 1000 Гц і вище. Точність вимірювання RR-інтервалів ± 1 мс. Проте в сучасних реаліях актуальним є проведення моніторингу стану пацієнта в амбулаторних умовах. Пацієнти з серцевими проблемами, а також здорові люди тепер можуть реєструвати сигнали ЕКГ і відправляти їх лікарям або медичним центрам з використанням телекомунікаційних технологій, що дозволяє включити запис ЕКГ незалежно від місця і часу [6]. З'явилися різні пристрої, які забезпечують зручність у повсякденному використанні при носінні на ремнях чи під одягом. За останні кілька років з'явилося безліч додатків для вимірювання ЕКГ з використанням смартфонів або спеціалізованих портативних приладів. Однак якість записаних сигналів залишається основною перешкодою для заміщення сигналів, записаних стандартними мокрими адгезивними електродами, які як і раніше є переважними для довготривалого запису. Погана якість сигналу і, як наслідок, низька клінічна значимість є основною причиною нечіткої класифікації та помилкової інтерпретації серцевих скорочень з артефактами. Тому використання смартфонів є недоцільним та немає функціонального обґрунтування.

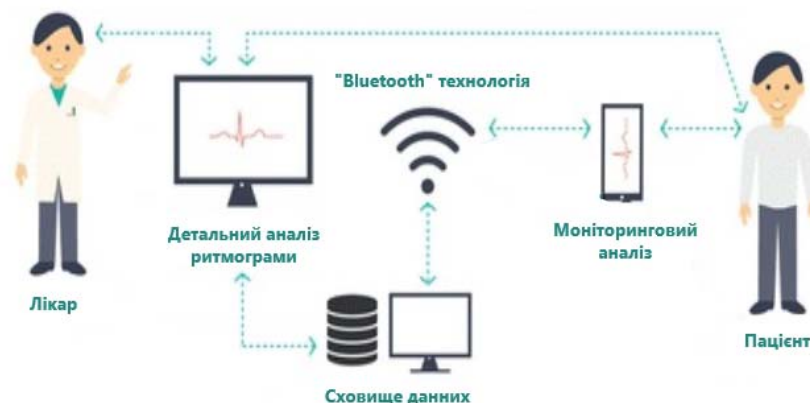


Рис. 1. Діаграма принципів компонентів апаратно-програмного комплексу для моніторингового аналізу ритмограм

Ми пропонуємо використання сучасних апаратно-програмних комплексів, що засновані на

використанні бездротових технологій, що могли б містити як довгострокові, так і короткотривалі режими запису та могли проводити моніторинговий аналіз ритмограм за дисперсією. При виході за межі норми вони могли б забезпечувати передачу інформації на сервер для збирання даних та подальшу відправку в медичний заклад для детального аналізу (рис. 1).

Висновки

Теоретичні основи аналізу ВСР повинні служити завданням клінікофізіологічної інтерпретації результатів досліджень. Успіх впровадження нової методології в практику багато в чому залежить від наявності адекватних технічних засобів. Аналіз ВСР пов'язаний з використанням апаратно-програмних комплексів, які повинні забезпечити надійний знімання інформації, надійне розпізнавання та вимірювання кардіоінтервалів з побудовою тимчасових динамічних рядів і застосування до них стандартизованих математичних процедур аналізу. Використання апарату вейвлет-аналізу для обробки медичної інформації є найбільш перспективним у порівнянні з іншими методами. Саме його використання дозволяє виявити ключові діагностичні ознаки і отримати частотно-часову характеристику досліджуваного сигналу.

Література

1. R. Baevskii, "Analysis of heart rate variability in space medicine. Fiziol Cheloveka", 2002, pp.70–82.
2. L.Mainardi, "On the quantification of heart rate variability spectral parameters using time-frequency and time-varying methods", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 367, no. 1887, pp. 255-275, 2009.
3. E. Miranda Dantas, M. Lima Sant'Anna, R. VarejãoAndreão, C. Pereira Gonçalves, E. AguiarMorra, M. PerimBaldo, S. Lamêgo Rodrigues and J. Geraldo Mill, "Spectral analysis of heart rate variability with the autoregressive method: What model order to choose?", Computers in Biology and Medicine, vol. 42, no. 2, pp. 164-170, 2012.
4. Sobko A., Kozyar V., Khudetsky I., Antonova-Rafi Y. The method of evaluation bioelectric activity of the brain in the study of electroencephalography /14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018 pp.326-329.
5. Анализ variability сердечного ритма: эволюционно-эпистемологический аспект. Размышление над книгой: Ардашев А. В., Лоскутов А. Ю. Практические аспекты современных методов анализа variability сердечного ритма, ИД «Медпрактика-М», vol. 1-219-20, pp. 414-416, 2018.
6. Л. Шилович, "Перспективы диагностического применения метода анализа variability сердечного ритма в спорте (обзор литературы)", Проблемы здоровья и экологии, pp. 59-63, 2012.

References

1. R. Baevskii, "Analysis of heart rate variability in space medicine. Fiziol Cheloveka", 2002, pp.70–82.
2. L.Mainardi, "On the quantification of heart rate variability spectral parameters using time-frequency and time-varying methods", Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 367, no. 1887, pp. 255-275, 2009.
3. E. Miranda Dantas, M. Lima Sant'Anna, R. VarejãoAndreão, C. Pereira Gonçalves, E. AguiarMorra, M. PerimBaldo, S. Lamêgo Rodrigues and J. Geraldo Mill, "Spectral analysis of heart rate variability with the autoregressive method: What model order to choose?", Computers in Biology and Medicine, vol. 42, no. 2, pp. 164-170, 2012.
4. Sobko A., Kozyar V., Khudetsky I., Antonova-Rafi Y. The method of evaluation bioelectric activity of the brain in the study of electroencephalography /14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018 pp.326-329.
5. Analisis variability serdechnogo ritma: evolutsionno-epistemologicheskyy aspekt. Razmishleniye nad knigoy: Ardashev A. V., Loskutov A. Yu. Prakticheskiye aspekty sovremennykh metodov analiza variability serdechnogo rithma, ID «Medpraktika-M», vol. 1-219-20, pp. 414-416, 2018.
6. L. Shilovich, "Perspektivi diagnosticheskogo primeneniya metoda analiza variability serdechnogo rithma v sporte (obzor literatury)", Problemy zdoroviya I ecologii, pp. 59-63, 2012.

Рецензія/Peer review : 10.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сидорець В.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В КОТУШЦІ СІДЛОПОДІБНОЇ ФОРМИ

Досліджено топологію напруженості високочастотного поля в робочій зоні прийомо-передавальної котушки сідлоподібної форми для спектрометра ядерного квадрупольного резонансу. З метою визначення топології магнітного поля створено розрахункову область, що являється моделлю фізичної конструкції сідлоподібної котушки. Методом кінцевих елементів проведено числове моделювання у середовищі COMSOL Multiphysics. За результатами проведених розрахунків та отриманих карт полів визначено відносний об'єм робочої зони котушки, що складає 28,12 % від її повного об'єму. Для такого об'єму рекомендований розмір досліджуваних зразків складає $12 \times 18 \times 10 \text{ мм}^3$.

Ключові слова: ядерний квадрупольний резонанс, сідлоподібна котушка, топологія магнітного поля.

A.P. SAMILA

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

INVESTIGATION OF MAGNETIC FIELD TOPOLOGY IN A SADDLE-SHAPED COIL

The quality of starting materials is determined by the presence of dislocations and structural defects in the layered semiconductor single crystals. One of modern and sensitive methods of studying the quality of layered semiconductors is nuclear quadrupole resonance method. The signal/noise ratio at spectrometer output is determined by the noise ratio of microwave spectrometer input stage and, primarily, by the quality of receiving coil or resonator. A topology of high-frequency field intensity in the work area of a saddle-shaped coil was studied. For a more complete representation with regard to geometric features of a real configuration of saddle-shaped coil, its 3D model was developed. With a view to determine magnetic field topology, a computational domain was created which is a model of a saddle-shaped coil physical structure. The model describes a system of coil with the following parameters: radius $r_0=10 \text{ mm}$, length $\Delta x=25.2 \text{ mm}$, opening angle of arc areas $\varphi=120^\circ$. Copper with the electric conductivity $\sigma=5.998 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ and relative magnetic permeability $\mu_r=0.99999$ was selected as material for coil conductors. As long as the coil is to be made according to planar technology, by etching flat copper turns on the surface of thin PCB laminate material, the winding is considered to be single-turn, realized by a conductor of cross-section $1 \cdot 10^{-4} \times 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Finite element method was used to perform numerical simulation in COMSOL Multiphysics software. On the external boundary of the computational region the boundary conditions were specified by the Dirichlet condition represented in the differential form. This allowed ignoring scattering fluxes that are closed through the air gap on the external boundary of the computational region by specifying magnetic isolation condition. A 2D and 3D maps of static magnetic field intensity distribution of a saddle-shaped coil were calculated. According to the results of calculations performed and the field maps obtained, the relative volume of coil work area was determined which makes 28,12 % of its full volume. For such a volume the recommended size of samples under study is $12 \times 18 \times 10 \text{ mm}^3$.

Keywords: nuclear quadrupole resonance, saddle-shaped coil, the magnetic field topology.

Вступ

На сучасному етапі розвитку напівпровідникової електроніки особливої уваги здобули шаруваті напівпровідникові матеріали групи A^3B^6 , як перспективний матеріал для реалізації стійких до іонізуючого випромінювання пристроїв електронної техніки [1]. Якість вихідних матеріалів визначається наявністю дислокацій і структурних дефектів у шаруватих напівпровідникових монокристалах. Одним із сучасних та чутливих методів дослідження якості шаруватих напівпровідників є метод ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) [2]. Застосування даного методу уможливило послідовне сканування усього об'єму зразка шаруватого напівпровідника, що дозволяє зробити висновок про досконалість кристалу за отриманими спектрами ЯКР. Важливою технічною характеристикою радіоспектрометрів ЯКР є чутливість, яка визначається кількістю спінів в одиниці об'єму речовини. Але на практиці більш зручно оцінювати відносну чутливість за величиною співвідношення сигнал/шум на виході спектрометра [3].

Метою даної статті є визначення оптимального робочого об'єму сідлоподібної котушки ЯКР-спектрометра шляхом створення тривимірної моделі магнітного поля та розрахунку топології магнітного поля у робочій зоні методом кінцевих елементів.

Постановка задачі дослідження

Співвідношення сигнал/шум (ССШ) на виході спектрометра визначається коефіцієнтом шуму вхідного каскаду радіоспектрометра і, насамперед, якістю приймальної котушки або резонатора. Для аналітичної оцінки ССШ спектрометрів, які працюють у метровому радіодіапазоні, можна застосувати формулу [3]:

$$\text{ССШ} = \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{\omega_0^3 \cdot \eta \cdot Q \cdot V_s \cdot T_2}{2 \cdot \mu_0 \cdot k \cdot T \cdot F \cdot b_R \cdot T_1} \right)^{1/2} \cdot \frac{\chi_0}{\gamma}, \quad (1)$$

де η – коефіцієнт заповнення; Q – добротність резонансного контуру; V_s – об'єм зразка; T_1 і T_2 – часи ядерної спин-гратчатої та спин-спинової релаксації; μ_0 – магнітна проникливість середовища; k – постійна

Больцмана; T – абсолютна температура; F – коефіцієнт шуму попереднього підсилювача; b_R – ширина смуги пропускання підсилювального тракту радіоспектрометра; χ_0 – магнітна сприйнятливості досліджуваної речовини; γ – гіромагнітне відношення для резонуючих ядер.

З формули (1) видно, що при всіх інших умовах при формуванні ССШ основну роль відіграє фактор якості приймальної котушки ηQ . Параметр η залежить від об'єму котушки, заповненого речовиною. Насправді він залежить ще і від однорідності поля, в якому знаходиться зразок. Тому вводять деяке ефективне значення η' , яке залежить від розподілу високочастотного поля у зразку, що заповнює котушку. Це особливо важливо при імпульсному детектуванні сигналу резонансу, де максимальна інтенсивність сигналу відгуку в значній мірі залежить від напруженості високочастотного поля в котушці (\mathbf{H}_1) під час дії імпульсу тривалістю t_i і досягається при умові [4]:

$$\gamma \mathbf{H}_1 t_i = \pi / 2,$$

де $\pi/2$ – кут повороту ядерних спінів. В порошкоподібних зразках для ЯКР такий кут може складати $0,66 \pi$. При наявності градієнта напруженості високочастотного поля в межах зразка в процесі формування сигналу відгуку спостерігається «розпливання» сумарного вектора намагніченості спінів, що приводить до розширення сигналу резонансу і зниження амплітуди його інтенсивності. Підвищення однорідності високочастотного поля особливо важливе при детектуванні слабких сигналів, які спостерігаються при дослідженні речовин з малою природною поширеністю магнітоактивних ядер. При неоднорідному високочастотному полі повне заповнення котушки досліджуваною речовиною не призводить до очікуваного підсилення сигналу згідно формулі (1). Тому при виборі конфігурації котушки і її виготовленні чинник якості ηQ з урахуванням однорідності поля грає вирішальне значення в забезпеченні оптимальних умов отримання сигналу резонансу.

Топологія напруженості високочастотного поля в соленоїдальній котушці давача радіоспектрометра розглядалась в [5]. Для забезпечення обмеженої зони сканування досліджуваного зразка та більш ефективної взаємодії радіочастотного поля з кристалом для збудження і прийому сигналу спінової індукції доцільно застосовувати приймально-передавальну котушку спектрометра сідлоподібної форми (рис. 1), в якій вектор високочастотного поля \mathbf{H}_1 спрямований нормально до напрямку росту кристалу. Необхідність застосування одновиткової котушки обумовлене типом досліджуваних зразків. А саме, частотою ядерного квадрупольного резонансу для інструментально зручних спінових переходів шаруватих напівпровідникових кристалів InSe вироцнених методом Бріджмена. Для даних сполук характерні складні мультиплетні спектри ЯКР, які вивчені багатовитковими (5-10 витків) соленоїдальними котушками на частотах до 20 МГц. Сідлоподібну котушку планується застосувати для вивчення якості шаруватої структури шляхом зонного сканування всього об'єму досліджуваного зразка на частотах 30–40 МГц. Для налаштування спектрометра ЯКР в даному діапазоні необхідна котушка резонансного контуру з малою індуктивністю. Відношення сигнал/шум для радіочастотної котушки можна представити виразом [6, 7]:

$$ССШ \approx \frac{\mathbf{H}_1 V \sqrt{Q} \mathbf{H}_0^{3/2}}{\sqrt{\Delta \omega}},$$

де \mathbf{H}_1 – напруженість магнітного поля, створюваного приймальною котушкою при одиничному струмі в ній; V – збуджуваний об'єм зразка; Q – добротність радіочастотної системи; \mathbf{H}_0 – напруженість поляризуючого магнітного поля; $\Delta \omega$ – смуга частот.

Величина \mathbf{H}_1 визначає чутливість котушки. Тому необхідно максимально збільшувати відносний робочий об'єм котушок з тим, щоб їх провідники перебували якомога ближче до досліджуваного об'єкта. Допустима неоднорідність поля для реєстрації ЯКР з мінімальними спотвореннями резонансних спектрів повинна складати 10 – 15 % [7, 8].

Для визначення карти магнітного поля необхідно провести синтез і створити польову модель котушки. Однією із перших задач при створенні польової моделі є визначення геометрії моделі. Для найбільш повного представлення з урахуванням геометричних особливостей реальної форми котушки сідлоподібної форми розроблено її тривимірну модель (рис. 1).

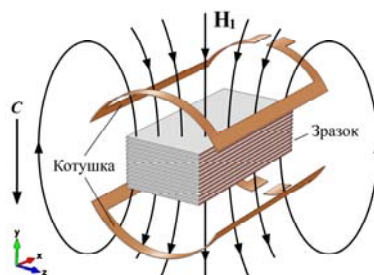


Рис. 1. Конфігурація приймально-передавальної котушки сідлоподібної форми та розміщення кристалічного шаруватого напівпровідника в ній

При розробленні даної моделі враховані рекомендації, щодо геометрії сідлоподібних котушок приведені в роботі [7]. Сумарна поперечна складова напруженості поля радіочастотної котушки визначається полем чотирьох лінійних і чотирьох дугових провідників:

$$\mathbf{B}_S = 4(\mathbf{B}_{yL} + \mathbf{B}_{yA}).$$

Поперечна складова поля лінійного провідника нескінченної довжини, розташованого в координатах y_0, z_0 , в точці y, z визначається виразом:

$$\mathbf{H}_{yL} = \frac{\mu_0 I (z - z_0)}{2\pi [(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]}.$$

Складова напруженості поля робочого провідника з координатами початку x_1, y_0, z_0 і кінця x_2, y_0, z_0 визначається виразом:

$$\mathbf{H}_{yL} = \frac{\mu_0 I (z - z_0)}{4\pi r^2} \left(\frac{x_1 - x}{\sqrt{r^2 + (x_1 - x)^2}} - \frac{x_2 - x}{\sqrt{r^2 + (x_2 - x)^2}} \right). \quad (2)$$

Поперечна складова напруженості магнітного поля дугового провідника котушки рівна:

$$\mathbf{H}_{yA} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^\phi \frac{r_0 (x_1 - x) \cos \phi_0}{[r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos(\phi_0 - \phi) + (x_1 - x)^2]^{3/2}} d\phi_0. \quad (3)$$

Для підвищення однорідності поля \mathbf{H}_y , оптимальне значення Δx і кутових розмірів дуг котушки можна визначити, компенсуючи другі похідні виразів для напруженості магнітного поля лінійних провідників (2) і дуг (3) з метою усунення відповідних членів розкладів цих виразів в степеневий ряд [7]. Оптимальне значення кутового розміру дугових ділянок:

$$\phi = 2 \arctg \left(\frac{y_0}{z_0} \right) = 120^\circ. \quad (4)$$

Виходячи з умови максимальної неоднорідності складової \mathbf{B}_{yA} поля лінійних провідників, їх довжина рівна:

$$\Delta x = 2(1,26r_0). \quad (5)$$

Модель сідлоподібної котушки в середовищі Comsol Multiphysics

Для розрахунку тривимірних карт полів широке застосування отримали комп'ютерні програми на основі методу кінцевих елементів, такі як ANSYS, COMSOL, ELCUT. Стримуючим фактором широкого застосування об'ємного моделювання є відсутність чіткого теоретичного обґрунтування постановок задач чисельного розрахунку електромагнітного поля, які в деяких випадках виходять за рамки класичної теорії електромагнітного поля. У першу чергу, це стосується формулювань задач розрахунку електромагнітного поля відносно векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів [9].

Аналіз топології магнітного поля сідлоподібної котушки проведено у середовищі COMSOL Multiphysics V 4.4, що надає широкі можливості в області моделювання електромагнітних, теплових, механічних, акустичних та інших полів [10]. Задача розрахунку магнітного поля формулювалася відносно векторного магнітного потенціалу \mathbf{A} [11]. Враховуючи вихідні геометричні розміри досліджуваних зразків та співвідношення (4) і (5) було створено розрахункову область, що являється моделлю фізичної конструкції сідлоподібної котушки, для якої проводиться числове моделювання. Модель описує систему котушки з такими параметрами: радіус $r_0=20$ мм, довжина $\Delta x=25,2$ мм, кут розкриття дугових ділянок $\phi=120^\circ$ (рис. 2). В якості матеріалу провідників котушки вибрано мідь з електричною провідністю $\sigma=5,998 \cdot 10^{-7}$ См/м та відносною магнітною проникністю $\mu_r=0,99999$.

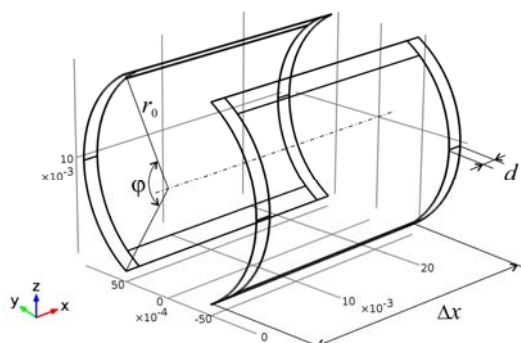


Рис. 2. Об'ємне зображення геометричної моделі сідлоподібної котушки в середовищі COMSOL

При розробленні даної моделі приймалися наступні припущення. Оскільки котушку планується виготовити за планарною технологією, шляхом витравлювання плоских мідних витків на поверхні тонкого текстоліту, обмотку вважаємо одновитковою виконаною провідником з поперечним перерізом $1 \cdot 10^{-4} \times 1,6 \cdot 10^{-3}$ м. Для спрощення аналізу витки котушки представлено у вигляді замкнутих периметрів у яких протікає постійний струм та виключено вплив під'єднаних провідників. Напрямок протікання струму I_{coil} моделюється вздовж встановлених для кожного витка котушки границь «reference edge». Область моделювання

магнітного поля обмежена повітряною сферою з електричною провідністю $\sigma=0$ См/м та відносною магнітною проникністю $\mu_r=1$. Радіус сфери – $R=3 \cdot 10^{-2}$ м, температура та тиск повітря прийнято $T=293,15$ К та $P=1$ атм, відповідно. На зовнішній границі розрахункової області граничні умови задавались умовою Діріхле представленою в диференційному вигляді. Це дозволило знехтувати потоками розсіювання, що замикаються через повітряний проміжок на зовнішній границі розрахункової області шляхом задавання умови магнітної ізоляції (*Magnetic isolation*), яка за замовчуванням в COMSOL Multiphysics має вигляд $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$. Розрахунок топології магнітного поля здійснено в модулі *Magnetic Fields (mf)*. В результаті тріангуляції розрахункової області створена сітка кінцевих елементів із згущеннями в області поля з максимальними градієнтами (рис. 3).

В COMSOL Multiphysics карту статичних магнітних полів можна розрахувати шляхом розв'язування магнітостатичного рівняння отриманого із закону Ампера для статичних випадків

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J},$$

де ∇ – диференційний оператор Гамільтона, \mathbf{H} – напруженість магнітного поля, \mathbf{J} – амплітуда повної густини струму.

Співвідношення між напруженістю магнітного поля \mathbf{H} та густиною магнітного потоку (індукцією) \mathbf{B} представляють залежності:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A};$$

$$\mathbf{H} = \mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \mathbf{B}.$$

Враховуючи величину відносної магнітної проникності для міді та визначення векторного потенціалу магнітного поля \mathbf{A} запишемо результуюче диференційне рівняння магнітостатики у вигляді модифікованого закону Ампера:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \sigma \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e,$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму, μ_r – відносна магнітна проникність міді, σ – питома електропровідність, v – швидкість руху, \mathbf{J}_e – амплітуда зовнішньої густини струму.

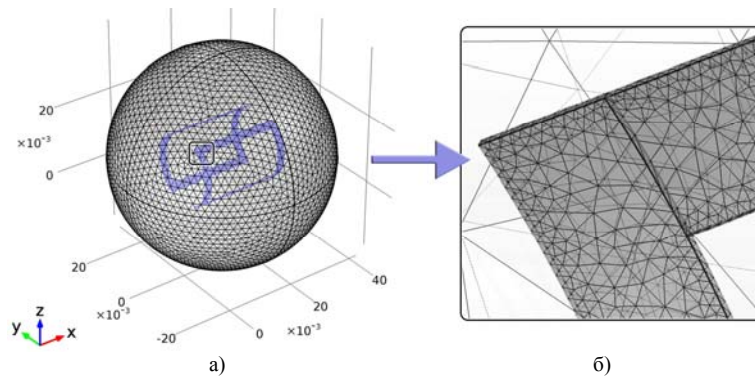


Рис. 3. Сітка кінцевих елементів отримана унаслідок тріангуляції розрахункової області: загальний вид (а), деталізоване представлення фрагменту котушки (б)

Значення зовнішньої густини струму визначаються тільки в зонах моделі, що представляють сідлоподібну котушку індуктивності та визначається через протікаючий в її периметрі струм:

$$\mathbf{J}_e = \frac{\mathbf{I}_{coil}}{S},$$

де \mathbf{I}_{coil} – заданий струм та S – площа поперечного перерізу периметру котушки.

Результати моделювання

Оброблення результатів чисельного моделювання проведена вбудованими засобами COMSOL з допомогою об'єктів і опцій пункту «Results». В цьому пункті автоматично створюються об'єкти необхідні для графічного представлення результатів після завершення розрахунку, у вікні «Graphics» відображається графічне представлення результатів чисельного моделювання. Параметрами відображення задавались в залежності від представлення графічних результатів.

При проведенні моделювання враховані граничні умови, що описують розподіл магнітного поля на межах розрахункової області. Результати моделювання представлені двомірними картами полів в площинах перерізу ZX , XY , YX (рис. 4 – рис. 6) для випадку протікання в котушці постійного струму $\mathbf{I}_{coil} = 10$ А.

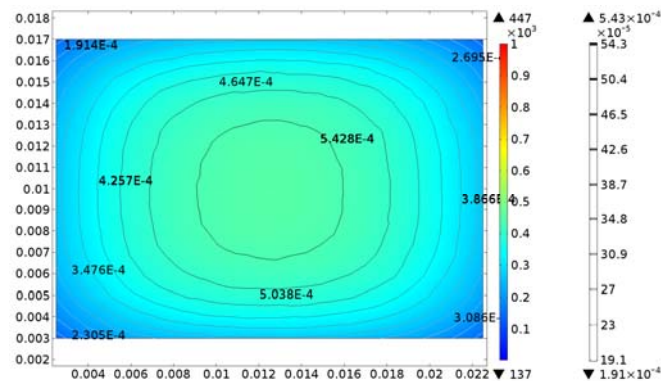


Рис. 4. Топологія магнітного поля в робочій зоні площини ZX сідлоподібної котушки: розподіл напруженості (градієнтне поле) та індукції (контурні лінії) магнітного поля в площині ZX

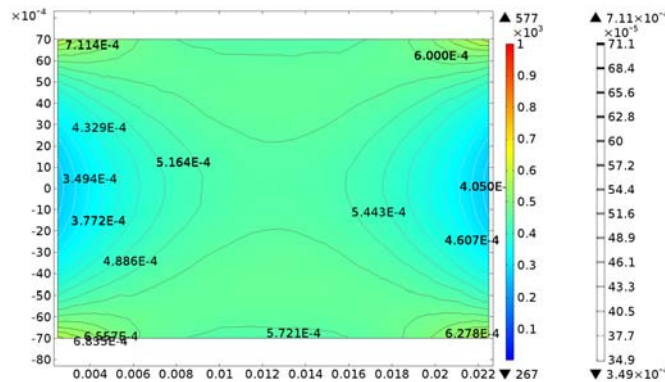


Рис. 5. Топологія магнітного поля в робочій зоні площини XY сідлоподібної котушки: розподіл напруженості (градієнтне поле) та індукції (контурні лінії) магнітного поля в площині XY

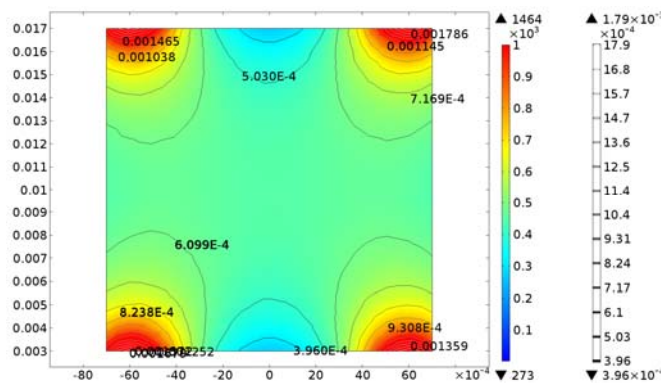


Рис. 6. Топологія магнітного поля в робочій зоні площини XY сідлоподібної котушки: розподіл напруженості (градієнтне поле) та індукції (контурні лінії) магнітного поля в площині XY

Представлені на даних рисунках залежності розподілу напруженості магнітного поля показують, що зони допустимої неоднорідності поля (не більше 15 %) по обидві сторони від геометричного центру сідлоподібної котушки складають: 12,3 мм вздовж вісі x , 18,1 мм вздовж вісі y , та 10 мм вздовж вісі z . За результатами проведених розрахунків та отриманих карт полів визначено відносний об'єм робочої зони котушки, що складає 28,12% від її повного об'єму. Для такого об'єму рекомендований розмір досліджуваних зразків складає $12 \times 18 \times 10 \text{ мм}^3$.

Висновки

Для забезпечення обмеженої зони сканування зразка шаруватого напівпровідника та більш ефективної взаємодії радіочастотного поля з кристалом проведено дослідження оптимального робочого об'єму сідлоподібної котушки ЯКР-спектрометра шляхом розрахунку топології магнітного поля у робочій зоні котушки методом кінцевих елементів.

1. Враховуючи вихідні геометричні розміри досліджуваних зразків створено розрахункову область, що являється моделлю фізичної конструкції сідлоподібної котушки з довжиною $\Delta x = 25,2$ мм, радіусом $r_0 = 20$ мм та кутом розкриття дугових ділянок $\varphi = 120^\circ$.

2. Проведено числове моделювання у середовищі COMSOL Multiphysics і розраховані карти розподілу напруженості статичного магнітного поля сідлоподібної котушки в двовірному та тривірному представленні.

3. Визначено, що для одновиткової сідлоподібної котушки із вказаними геометричними параметрами рекомендований розмір зразків досліджуваних методом ЯКР складає $12 \times 18 \times 10 \text{ мм}^3$, що

становить 28,12 % від повного об'єму котушки.

Література

1. Kyazym-Zade A.G. Optical detectors on GaSe and InSe layered crystals / A.G. Kyazym-Zade, A.A. Agaeva, V.M. Salmanov, A.G. Mokhtari // *Technical Physics*. – 2007. – Vol. 52, No. 12. – P. 1611–1613.
2. Khandozhko V. Temperature and baric dependence of nuclear quadruple resonance spectra in indium and gallium monoselenides / V. Khandozhko, N. Raranskii, V. Balazjuk, Z. Kovalyuk, A. Samila // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 9066. – P. 90661G–1-7.
3. Schneider H. Slotted tube resonator: A new NMR probe head at high observing frequencies / H. Schneider and P. Dullenkopf // *Review of Scientific Instruments*. – 1977. – Vol. 48, No. 1. – P. 68–73.
4. Grechishkin V.S. Remote nuclear quadrupole resonance in solids / V.S. Grechishkin and N.Ya. Sinyavskii // *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. – 1993. – Vol. 36, No. 10. – P. 980–1003.
5. Браїловський В.В. Оптимізація топології напруженості високочастотного поля давача радіоспектрометра / В.В. Браїловський, А.П. Саміла, О.Г. Хандожко // *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. – 2009. – № 646. – С. 46–51.
6. The NMR receiver: a description and analysis of design / Hoult D.I. // *Progress in NMR Spectroscopy*. – 1978. – Vol. 12, No. 1. – P. 41–77.
7. Расчет и проектирование магнитных систем : учебное пособие [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу : http://open.ifmo.ru/images/b/b6/144261_book.pdf.
8. Marrocco B.J.D. An optimized head coil design for MR imaging at 0.15 T / B.J.D. Marrocco, D.J. Drost, F.S. Prato // *Magnetic Resonance in Medicine*. – 1987. – Vol. 5, No. 2. – P. 143–159.
9. Glukhenkyi O.I. Three-dimensional simulation of single-phase electromagnetic stirrer of liquid metal / O.I. Glukhenkyi, Yu.M. Goryslavets, A.V. Tokarevskiy // *Technical Electrodynamics*. – 2013. – No. 5. – P. 77–84.
10. Understand, Predict, and Optimize Engineering Designs with the COMSOL Multiphysics® Software [Електронний ресурс] COMSOL Multiphysics®. – 2017. – Режим доступу : <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
11. Glukhenkyi O.I. Scalar electric and vector magnetic potentials in theory of electromagnetic field / O.I. Glukhenkyi, Yu.M. Goryslavets // *Technical Electrodynamics*. – 2012. – No. 2. – P. 7–8.

References

1. Kyazym-zade A.G., Agaeva A.A., Salmanov V.M. and Mokhtari A.G. Optical detectors on GaSe and InSe layered crystals, *Technical Physics*, 2007, Vol. 52, No. 12, P. 1611–1613.
2. Khandozhko V., Raranskii N., Balazjuk V., Kovalyuk Z. and Samila A. Temperature and baric dependence of nuclear quadruple resonance spectra in indium and gallium monoselenides. *Proceedings of SPIE*, 2013, Vol. 9066, P. 90661G–1-7.
3. Schneider H. and Dullenkopf P. Slotted tube resonator: A new NMR probe head at high observing frequencies, *Review of Scientific Instruments*, 1977, Vol. 48, No. 1, P. 68–73.
4. Grechishkin V.S. and Sinyavskii N.Ya. Remote nuclear quadrupole resonance in solids, *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 1993, Vol. 36, No. 10, P. 980–1003.
5. Brailovskyy V.V., Samila A.P. and Khandozhko O.G. Topolohiya napruzenosti vysokochastotnoho polya kotushky davacha radiospektrometra, *Visnyk of Lviv Polytechnic National University*, 2009, No. 646, S. 46–51.
6. Hoult D. I. The NMR receiver: a description and analysis of design, *Progress in NMR Spectroscopy*, 1978, Vol. 12, No. 1, P. 41–77.
7. Raschet i proyektirovaniye magnitnykh sistem, 2017. URL: http://open.ifmo.ru/images/b/b6/144261_book.pdf.
8. Marrocco B.J.D., Drost D.J. and Prato F.S. An optimized head coil design for MR imaging at 0.15 T, *Magnetic Resonance in Medicine*, 1987, Vol. 5, No. 2, P. 143–159.
9. Glukhenkyi O.I., Goryslavets Yu.M. and Tokarevskiy A.V. Three-dimensional simulation of single-phase electromagnetic stirrer of liquid metal, *Technical Electrodynamics*, 2013, No. 5, P. 77–84.
10. Understand, Predict, and Optimize Engineering Designs with the COMSOL Multiphysics® Software, COMSOL Multiphysics®, 2017. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
11. Glukhenkyi O.I. and Goryslavets Yu.M. Scalar electric and vector magnetic potentials in theory of electromagnetic field, *Technical Electrodynamics*, 2012, No. 2, P. 7–8.

Рецензія/Peer review : 19.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.

Рецензент: д.т.н. Любчик В.Р.

**ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІКРИ ОСЕТРОВИХ І БІЛОГО АМУРА НА ОСНОВІ
ІНФОРМАЦІЙНИХ І МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НЕЧІТКИХ МНОЖИН**

В статті запропоновано новий метод раннього оцінювання якості продуктивності ікри лососевих та осетрових риб, створено інформаційно-структурну модель PPPR для підтримки прийняття рішень, наведено окремі біотехнічні етапи розведення та вирощування осетрових з різним ступенем детальності, формування структури маточних стад лососевих та осетрових, управління сезонністю їх розмноження за допомогою фотонних технологій обробки ікри лососевих та осетрових риб.

Ключові слова: інформаційна технологія, підтримка прийняття рішень, ікра риб, етапи розведення, етапи вирощування.

N. V. TITOVA, S. V. PAVLOV, S. M. ZLEPKO, E. L. PIROTTI
Vinnytsia National Technical University

**EVALUATION OF QUALITY OF ICES OF ASTERIUM AND WHITE AMURAS BASED ON INFORMATIONAL
AND MATHEMATICAL MODELS OF INFANT MULTIPLES**

The sharp contraction of the number of mature producers in the Caspian Sea and the Azov Seas, despite the prohibition of specialized sturgeon fishing since 2000, has led to the need for the rapid formation of uterine herds. The necessity of research in this direction is explained by the fact that in the last two decades special research and experimental works have been carried out in Ukraine, Italy, the USA, France, Russia and analyzed and summarized the experience of commodity cultivation, formation and fish farming of various herds of various types of sturgeon, including passageways, significantly improved existing and developed new methods and technological methods for the cultivation of sturgeon fish. In addition, despite the intensive development of various forms of commercial sturgeon in Ukraine (including farmer), caviar from artificially created uterine herds is still produced only on an experimental scale. One of the reasons for this is the lack of up-to-date expert systems for assessing the reproductive quality of sturgeon caviar, which would significantly improve the efficiency of the formation and use of not only "dairy", but also tribal and collectible stock breeds of salmon and sturgeon. The development of a new rapid method of early evaluation of reproductive quality of salmon and sturgeon caviar and determining the stages of maturity of the gonads allows solving this problem. At the same time, the authors consider certain biotechnical stages of breeding and growing sturgeons with varying degrees of detail, the formation of the structure of the breeding stock of salmon and sturgeon, and the management of the seasonality of their reproduction with the help of photonic technologies for the processing of sturgeon caviar. The article proposes a new method for early evaluation of the quality of salmon and sturgeon caviar productivity, created an information and structural model of the PPPR to support decision-making; some biotechnical stages of breeding and sturgeon cultivation with different degrees of detail, formation of the structure of the stock breeds of salmon and sturgeon, the management of their seasonality reproduction with the help of photonic technologies for treating salmon and sturgeon caviar.

Keywords: information technology, decision support, fish caviar, stages of breeding, stages of cultivation.

Вступ

Різне скорочення чисельності зрілих виробників в Каспійському і Азовському морях, незважаючи на заборону спеціалізованого промислу осетрових з 2000 р призвело до необхідності якнайшвидшого формування маточних стад. Необхідність досліджень в даному напрямку пояснюється ще й тим, що в останні два десятиліття в Україні, Італії, США, Франції, Росії та інших країнах були проведені спеціальні науково-експериментальні роботи, проаналізовано та узагальнено досвід товарного вирощування, формування і рибоводного використання маточних стад різних видів осетрових, включаючи прохідних, значно вдосконалені існуючі та розроблені нові методи і технологічні прийоми розведення осетрових риб.

Проблема

Крім того, незважаючи на інтенсивний розвиток різних форм товарного осетрівництва в Україні (включаючи фермерське), харчова ікра від штучно створених маточних стад до цих пір виробляється тільки в експериментальних масштабах. Однією з причин цього є відсутність до останнього часу експертних систем для оцінювання якості репродуктивності ікри осетрових риб, що дозволило б істотно підвищити ефективність формування і використання не тільки "дійних", а і племінних та колекційних маточних стад лососевих та осетрових.

Вирішення проблеми

Розвиток нового експрес-методу раннього оцінювання якості репродуктивності ікри лососевих та осетрових риб і визначення стадій зрілості гонад дозволяє вирішити цю проблему. Разом з тим, автори розглядають окремі біотехнічні етапи розведення та вирощування осетрових з різним ступенем детальності, формування структури маточних стад лососевих та осетрових, управління сезонністю їх розмноження за допомогою фотонних технологій обробки ікри осетрових риб.

Аналіз літературних джерел

Для того, щоб визначитися за якими критеріями розраховувати якісні показники ікри риб для штучного відтворення, необхідно розглянути будову ікринки. Ікра риб різних видів відрізняється за формою, будовою, розміром, забарвленням, хімічним складом [1, 8].

Форма ікринок осетрових риб трохи видовжена (яйцеподібна), лососевих та інших риб – майже правильна (куляста) (рис. 1).

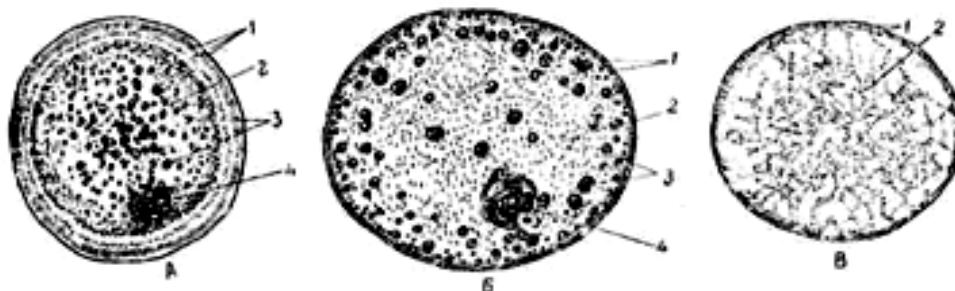


Рис. 1. Будова зерна ікри: А – осетрових риби; Б – лососевих риби; В – частикових риби: 1 – оболонка; 2 – білкова маса; 3 – жирові краплі; 4 – зародкові плями [1, 8]

Ікринки осетрових і лососевих риби складаються з оболонки, жовткової маси, жирової краплі і зародкового пухирця (вічка); інших риби – з оболонки і жовткової маси. Оболонка ікринок тонка, напівпрозора. Жовткова маса (молочко) напіврідка; вона являє собою колоїдний розчин білкових речовин із зваженими краплями жиру. У жовтковій масі розміщений зародковий пухирець.

Забарвлення ікринок також є специфічним для кожного виду. Ікра, що розвивається в менш сприятливих кисневих умовах, зазвичай забарвлена інтенсивніше. Ікра осетрових риби має світло-сіре і навіть чорне забарвлення. У тихоокеанських лососів ікра характерного помаранчевого або помаранчево-червоного кольору. Більшість видів риби (сазан, лящ, щука та ін.) мають ікру сірувато-жовтого або зеленувато-бурого забарвлення, ікра судака і жереха – світло-помаранчева, тріски і минтая – світло-жовта [1, 8].

Існує кількість іноземних методик, автори яких за допомогою візуальних спостережень або інструментальних вимірювань тестують якість ікри.

Оцінювання якості ікри у більшості випадків проводиться після її запліднення на різних стадіях розвитку ембріонів: від дроблення до вилуплення [2, 3, 4].

Для запліднення використовують ікру тільки високої якості, показниками якої є:

1. Правильна форма і однакові розміри ікринок.
2. Певна маса ікринок. Наприклад, в 1 г дозрілої ікри повинно міститися у білуги 35-40 ікринок, осетра 45-50 ікринок, севрюги - 75-90 ікринок.

3. Наявність на зародковому полюсі плями іншого забарвлення, ніж на іншій половині ікринки.

Ікринки багатьох риби містять одну або кілька жирових крапель, які забезпечують плавучість ікринок.

Також існує методика оцінки якості ікри за розподілом жирових крапель на поверхні ікринок, яка запропонована польським вченим А. Сiereszko (рис. 2):

- А – I група – з рівномірним розподілом дрібних крапель;
- Б – II група – зі згущеними та об'єднаними краплями;
- В – III група – з великими, об'єднаними на одному полюсі краплями.

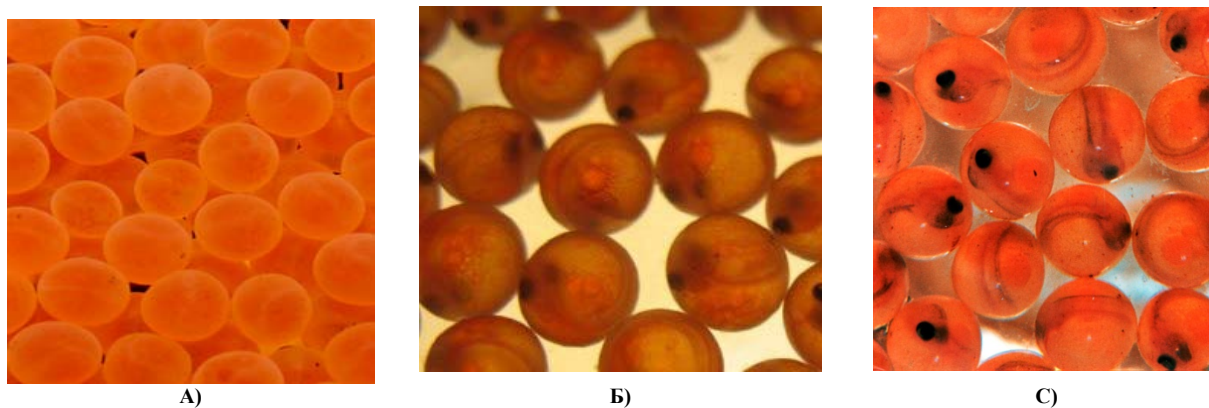


Рис. 2. Характер розташування жирових крапель по поверхні жовтка ікринок

Однак, недоліком цього методу є труднощі чіткого поділу на групи по розподілу жирових крапель на поверхні жовтка ікринок. Іншими дослідниками, наприклад [6], ця методика по оцінці якості ікри не підтверджується.

Метод оцінки якості ікри по відносному збільшенню ваги ікринок під час набухання запропоновано австрійськими вченими [7]. В серії дослідів, які проводилися на озерній форелі, показано, що коефіцієнт кореляції між вагою ікринки під час набухання та виходом ембріонів був позитивним ($r=0,58$) та статично ймовірним ($p=0,05$). Ікра високої якості мала вірогідно більший рівень поглинання води ($12,1 \pm 2,1\%$) порівняно з ікрою низької якості ($3,4 \pm 1,7\%$). Тобто ікра низької якості мала низьке набухання.

Таким чином, аналізуючи літературні джерела по оцінюванню якості ікри, можна зробити висновок, що чітких показників (параметрів) за якими можливо визначити якість ікри, не існує.

Основний текст статті

Розглянемо якість ікри за комплексним параметром, у вигляді сукупності: колір ікри, її розмір та рівень поглинання води:

Колір осетрової ікри будемо відмічати буквами:

А – ікра світло-сіра, сіра, жовта і світло-коричнева;

Б – ікра темно-сіра і коричнева;

У – ікра темна.

Для визначення кольору ікри перетворимо її кольорові зображення у відтінки сірого кольору за допомогою розробленої програми «Аналізатор властивостей біологічних об'єктів». При цьому вихідне зображення представляється у вигляді (рис. 3). Далі колірний режим зображень відображається у відтінках сірого кольору, де наведено шкалу в якості еталонів яскравості білого кольору (рис. 4). Шкала передає 256 відтінків (градаций) сірого кольору, або яскравості (значення 0 представляє чорний колір, а значення 255 – білий). Визначається розподіл значень яскравості пікселів даного зображення біологічного об'єкту (рис. 5).

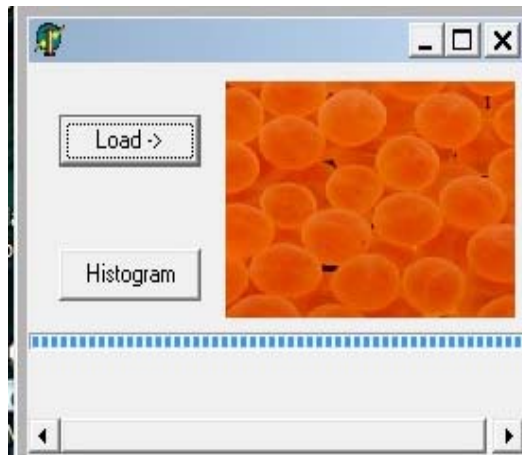


Рис. 3. Вихідне зображення біологічного об'єкту

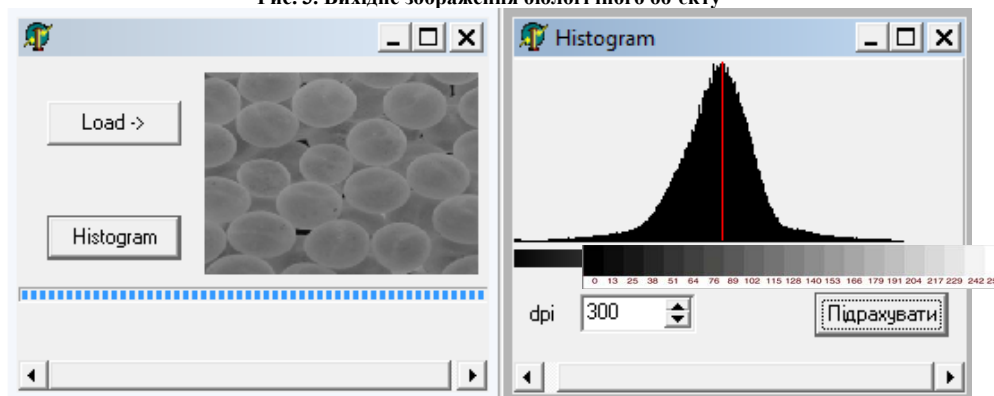


Рис. 4. Перетворення кольорових зображень у відтінки сірого кольору за допомогою розробленої програми «Project2»

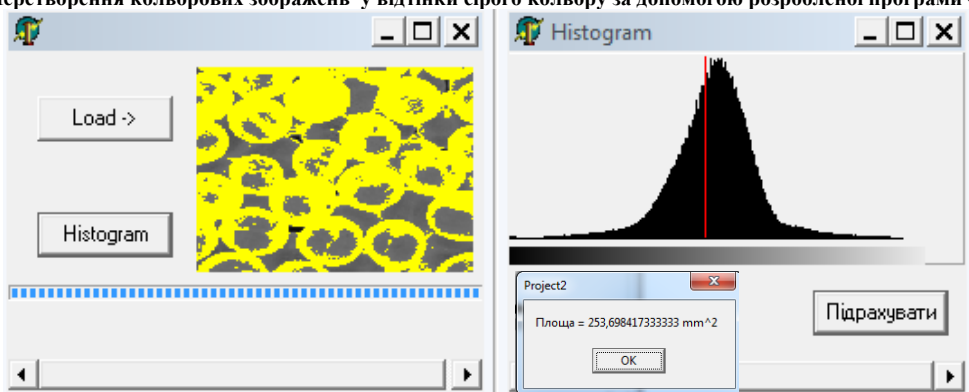


Рис. 5. Розподіл значень яскравості пікселів даного зображення біологічного об'єкту

Розмір лососевої та осетрової ікри.

Дрібна – до 1,5 мм в діаметрі

Середня – до 2 мм в діаметрі

Велика – до 3 мм в діаметрі.

Найбільш рідкісною і, відповідно, найдорожчою (іноді дорожче за ікру білуги) є ікра осетра за кольором дуже схожа на колір золота. Зерно цієї ікри має бути дуже великим (3-4 мм.)

Ікра білого амура має розмір від 1,2–1,4 мм. Але коли вона попадає до водного середовища її розмір збільшується в 4-5 разів, тобто розмір ікринки білого амура стає від 4,8–7,0 мм.

Для визначення розміру ікри використовується розроблене програмне забезпечення «Аналізатор властивостей біологічних об'єктів». При цьому формується вихідне зображення та трансформується зображення з відтінками сірого за допомогою фільтру Собела (рис. 6).

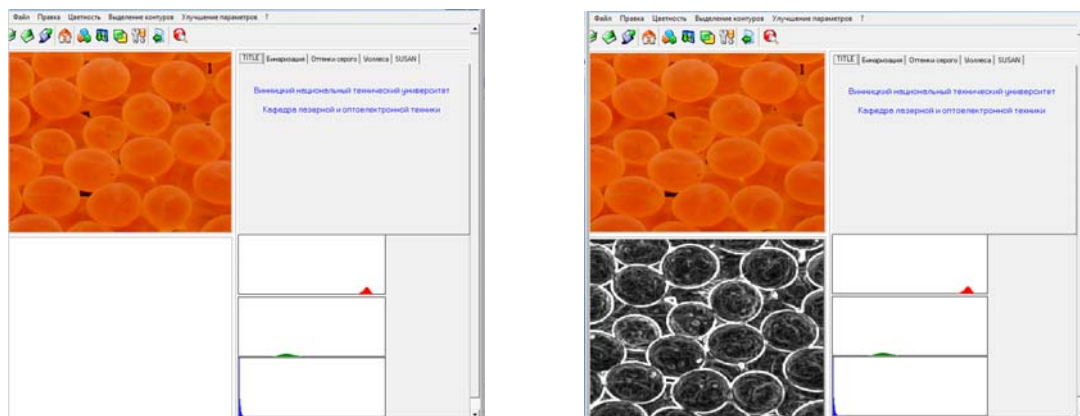


Рис. 6. Вихідне зображення та трансформоване зображення з відтінками сірого за допомогою фільтру Собела

Далі зображення бінаризується та визначається розмір біологічного об'єкта, зокрема розміру ікри осетрових риб (рис. 7, 8).

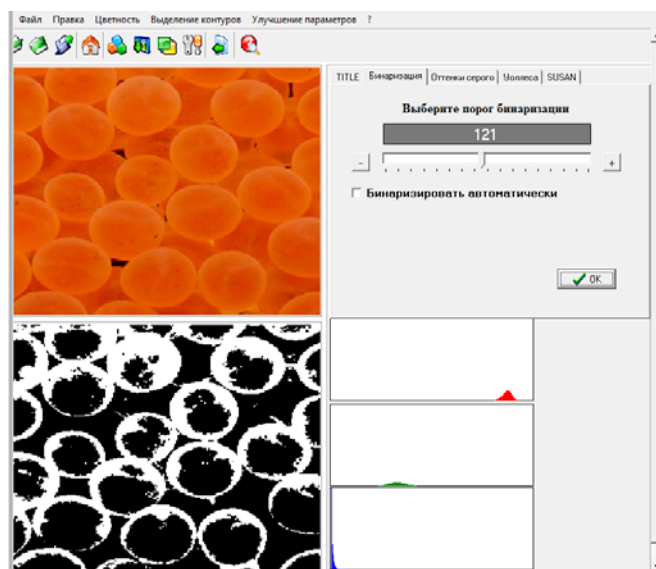


Рис. 7. Бінаризація зображень біологічних об'єктів

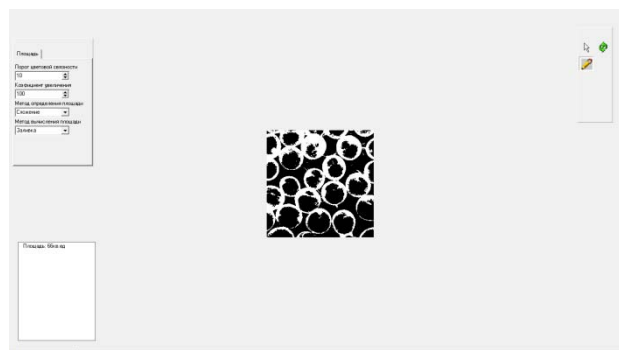


Рис. 8. Визначення розміру біологічних об'єктів

Зокрема застосування фотонного випромінювання ікринок риб надало збільшення розміру самих ікринок на 20% (при опроміненні зеленим кольором матриці) та збільшення виходу запліднених ікринок з 30% до 70%.

Для оцінювання якості лососевої та осетрової ікри розроблено інформаційно-структурну модель підсистеми підтримки прийняття рішень (рис. 9), яка входить до складу низькоенергетичної фотонної технології управління інкубаційним процесом осетрових і білого амура.

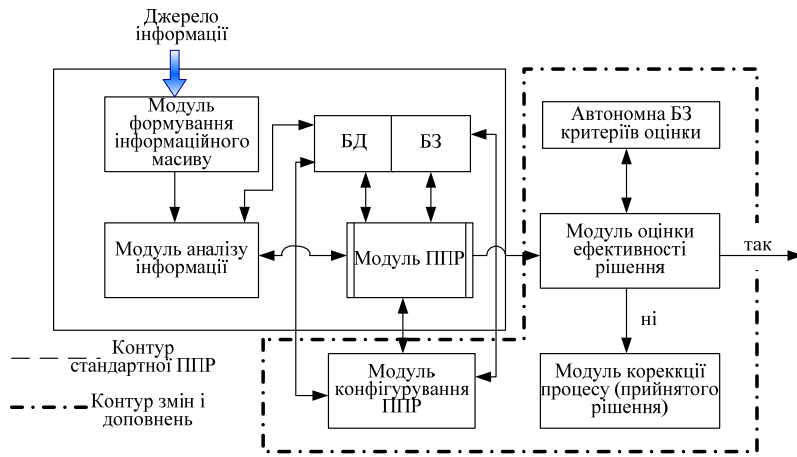


Рис. 9. Інформаційно-структурна модель ППР для ІФТ НЗП

Представлена модель включає в себе два контури: стандартної ППР і модернізованої, який складається з модуля оцінки ефективності прийняття рішень, бази знань, критеріїв оцінки, модуля корекції інформаційної складової процесу прийняття рішень, модуля конфігурування ППР (апаратно-програмна складова процесу).

Для оброблення інформації використовуються два підходи до організації біомедичних даних [9]: фрагментування; комплексування. При фрагментуванні задача оброблення даних підрозділяється на окремі частини з метою більш ефективного її розв'язання. При комплексуванні для вирішення окремих задач параметри об'єднуються в більш великі розділи.

У роботі пропонується застосування модуля ППР шляхом проектування та налаштування нечітких баз знань, які являють собою сукупність лінгвістичних висловлювань типу: якщо <входи>, то <виходи>. У загальному випадку вхідні змінні, які використовуються в експертній системі, можуть бути подані в якісній або кількісній формі.

Функція введення бази знань здійснюється у табличній формі на основі структури дерева виведення. Для розроблюваної інформаційно-структурної моделі ППР вигляд таблиці знань наведено у табл. 1.

Таблиця 1

База даних про співвідношення

Якість ікри осетрових риб	Розмір ікри (X_1)	Усереднене значення відтінку градації сірого кольору (X_2)	Значення рівня поглинання води (X_3)	Ступінь оцінювання
1	2	3	4	5
Відмінної якості	BC	C	BC	D1
	BC	BC	BC	
Доброї якості	HC	HC	C	D2
	HC	HC	HC	
	HC	C	C	

База даних про співвідношення

1	2	3	4	5
Доброї якості	HC	C	HC	D2
	C	HC	C	
	C	C	C	
	C	BC	C	
	C	BC	HC	
Задовільної якості	HC	H	H	D3
	HC	H	HC	
	HC	HC	HC	
	HC	HC	H	

Враховуючи той факт, що при опрацюванні біологічних показників доволі часто потрібно використовувати не тільки чіткі цифрові критерії, але й певні лінгвістичні характеристики змін показників (термів), нами проведено аналіз частини з них за допомогою математичного апарату нечіткої логіки. Такий підхід дозволяє одержати однозначний цифровий вираз для тих критеріїв, які мають описові характеристики і, відповідно, якісний зміст, наприклад такі ознаки, як Н – низький, НС – нижче середнього, С – середній, ВС – вище середнього, В – високий [9] (табл. 1)

Кожний з вказаних термів являє собою нечітку множину, яка задана за допомогою спеціальних функцій належності і може бути подана певним інтервалом, що має свої цифрові ступені від 0 до 1. Про абсолютну неналежність до множини свідчить 0, а про абсолютну належність – 1.

Для кожної з баз даних з метою формалізації показників визначаються відповідні функції належності [9]. Тому логічні рівняння для оцінювання важкості захворювання стану будуть мати такий вигляд (1–3):

$$\mu^{d1}(X_1, X_2, X_3) = \mu^{BC}(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \vee \mu^{BC}(X_1) \cdot \mu^{BC}(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d2}(X_1, X_2, X_3) = & \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^{HC}(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \vee \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^{HC}(X_2) \cdot \mu^{BC}(X_3) \vee \\ & \vee \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \vee \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^{HC}(X_3) \vee \mu^C(X_1) \cdot \mu^{HC}(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \vee \\ & \vee \mu^C(X_1) \cdot \mu^C(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \vee \mu^C(X_1) \cdot \mu^{BC}(X_2) \cdot \mu^C(X_3) \vee \mu^C(X_1) \cdot \mu^{BC}(X_2) \cdot \mu^{HC}(X_3); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d3}(X_1, X_2, X_3) = & \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \vee \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^{HC}(X_3) \vee \\ & \vee \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^{HC}(X_2) \cdot \mu^{HC}(X_3) \vee \mu^{HC}(X_1) \cdot \mu^{HC}(X_2) \cdot \mu^H(X_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Для побудови рівнянь необхідно визначити функції належності $\mu^j(x_i)$ всіх нечітких термів j (В, ВС, С, НС, Н) для всіх факторів x_i (в даному випадку j – значення коефіцієнта симетрії, i – інтервал дослідження: $i=1,4$). Якщо вважати високий рівень варіантом норми, то побудову рівнянь необхідно проводити для п'яти нечітких термів (В, ВС, С, НС, Н). При цьому кожному фактору x_i повинна відповідати своя п'ятірка функцій належності.

Для спрощення моделювання потрібно зробити певні дії:

Нехай \underline{x}_i і \overline{x}_i – нижня та верхня межі діапазону змін фактора x_i . Виразимо інтервал $[\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ на інтервал $U=[0, 4]$, на якому задані функції належності $\tilde{\mu}^j(u)$, $u \in U$ для нечітких термінів $j=В, ВС, С, НС, Н$.

Графічний вигляд функцій належності зображений на рис. 10. Вибір подібних кривих зумовлений тим, що вони є кусково-лінійними апроксимаціями експертних функцій належності $\mu^j(x_i)$, одержаних для факторів $x_1 \div x_4$ методом парних порівнянь.

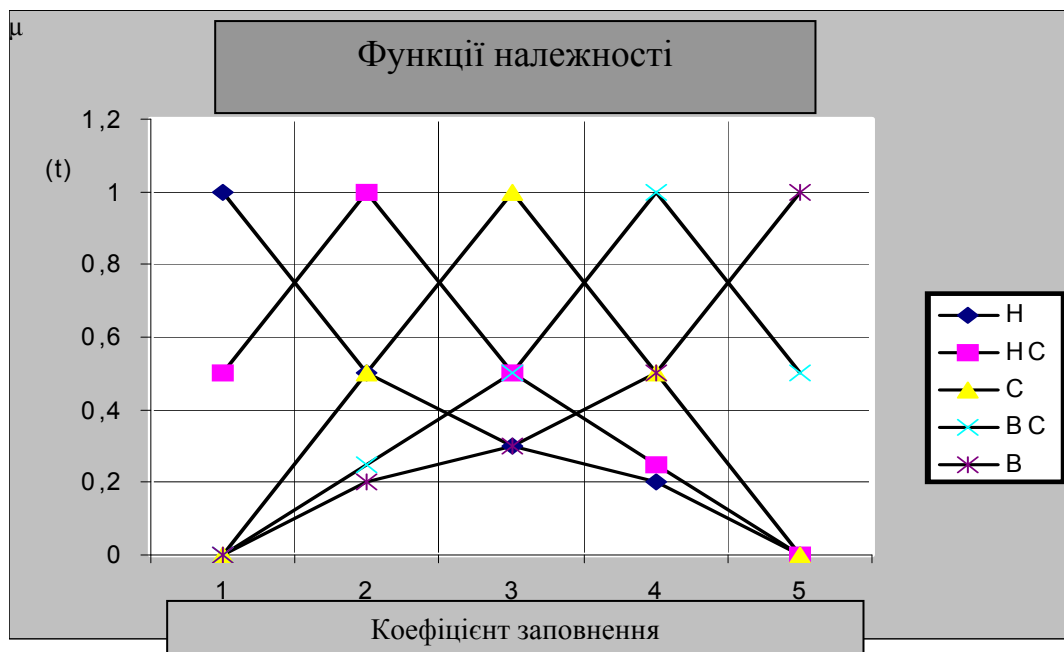


Рис. 10. Функції належності нечітких термів [9]

Перехід від функції $\tilde{\mu}^j(u)$ до шуканих функцій $\mu^j(x_i)$ здійснюється таким чином

$$u_i = 4 \frac{x_n - x_n}{x_n - x_n}, \quad \tilde{\mu}^j(u_n) = \mu^j(x_n) \quad (5)$$

Прийняття рішення про якість ікри лососевих та осетрових риб можна провести за таким алгоритмом [240]:

Крок 1: зафіксуємо значення факторів для конкретної ікри $x_n (n = \overline{1,4})$;

Крок 2: за формулами (1)–(4) визначимо значення функцій належності $\mu^j(x_n)$ при фіксованих значеннях факторів x_n ;

Крок 3: користуючись логічними рівняннями обчислимо функції належності $\mu^{d,n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ для усіх ступенів оцінювання $d_n, n = \overline{1,6}$. При цьому операції I (\cdot) та АБО (V) над функціями належності $\mu(a)$ та $\mu(b)$ замінюються на операції min та max

$$\mu(a) \cdot \mu(b) = \min[\mu(a), \mu(b)]; \quad \mu(a) V \mu(b) = \max[\mu(a), \mu(b)];$$

Крок 4: Визначається рішення d_0 , для якого

$$\mu^{d_0}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max[\mu^{d_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)]. \quad (6)$$

Цьому рішення і буде відповідати шуканий діапазон, який вказує на ступінь якості ікри лососевих та осетрових риб. У ході біологічних досліджень виникає задача настроювання нейронечіткої мережі (рис. 11). Для настроювання параметрів цієї мережі використовуються рекурентні співвідношення, запропоновані проф. Ротштейном О. П.

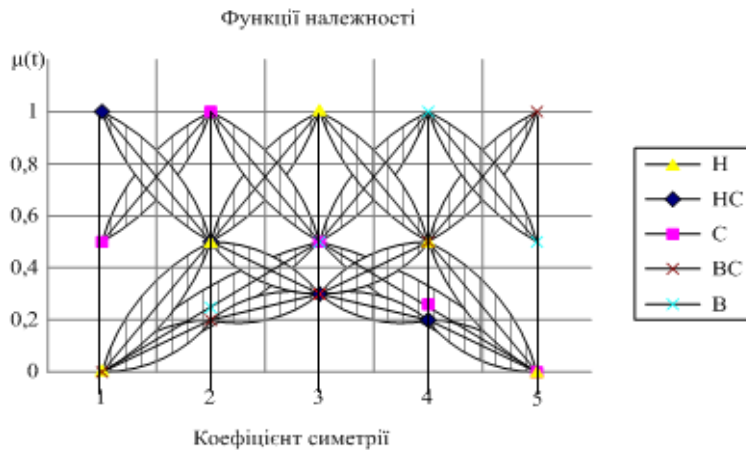


Рис. 11. Функції належності нечітких термів після процедури настроювання

Сутність настроювання моделі полягає у підборі таких параметрів функцій належності ($b_i^{jp}(t), c_i^{jp}(t)$) та ваг нечітких правил ($w_{jp}(t)$), які забезпечують мінімум розходження між моделями та діагностичними результатами

$$\sum_{i=1}^M (F_y(\hat{x}_1^l, \hat{x}_2^l, \dots, \hat{x}_{12}^l, W_i) - \hat{y}_l)^2 = \min_{W_i}, \quad (7)$$

де $\langle \hat{X}_l, \hat{y}_l \rangle, l = \overline{1, M}$ – дані експериментальних досліджень; b – координата максимуму; c – параметр ущільнення та розтягування.

Висновок

Запропоновано новий експрес-метод раннього оцінювання якості продуктивності ікри лососевих та осетрових риб. Запропоновано інформаційно-структурну модель ПППР для підтримки прийняття рішень шляхом проектування та налаштування нечітких баз знань, які являють собою сукупність лінгвістичних висловлювань типу: якщо <входи>, то <виходи>. У загальному випадку вхідні змінні, які використовуються в експертній системі, можуть бути подані в якісній або кількісній формі. Запропоновано окремі біотехнічні етапи розведення та вирощування осетрових з різним ступенем детальності, формування структури маточних стад лососевих та осетрових, управління сезонністю їх розмноження за допомогою фотонних технологій обробки ікри лососевих та осетрових риб.

Література

1. Детлаф Т. Л. Развитие осетровых рыб. (Созревание яиц, оплодотворение, развитие зародышей и предличинок) / Т.Л. Детлаф, А.С. Гинзбург, О.И. Шмальгаузен. – М. : Наука, 1981. – 224 с.
2. Мантельман И.И. Оценка производителей пеляди по жизнеспособности потомства / И.И. Мантельман // Генетика промысловых рыб и объектов аквакультуры. – М. : Легкая и пищевая пром., 1983. – С. 93–98.

3. Шиндавіна Н.И. Влияние различных факторов на средний вес икринок у радужной форели / Н.И. Шиндавіна // Проблемы и перспективы развития аквакультуры в России : тез. докл. межд. конф. – Краснодар, 2001. – С. 127–128.
4. Nagler J.J. Single pair mating indicates effects on embryo survival in rainbow trout / J.J. Nagler, J.E. Persons, J.G. Cloud // *Aquaculture*. – 2000. – Vol. 184. – P. 17–183.
5. A lack of consistent relationship between distribution of lipid droplets and egg quality in hatchery-raised rainbow trout / A. Ciereszko [at al.] // *Aquaculture*. – 2004. – Vol. 242. – P. 617–624.
6. Моисеева Е.В. Биологические основы повышения эффективности разведения радужной форели в условиях прлеменных заводов : автореф. дис. канд. биол. наук : 03.02.06 – ихтиология / Моисеева Елена Владимировна. – Краснодар, 2015. – 23 с.
7. Lahnsteiner F. Rainbow trout egg quality determination by the relative weight increase during hardening: a practical standardization / F. Lahnsteiner, R.A. Patzner // *Journal of Applied Ichthyology*. – 2002. – Vol. 18. – P. 2–26.
8. Чебанов М.С. Руководство по разведению и выращиванию осетровых рыб / Чебанов М.С., Галич Е.В., Чмырь Ю.Н. – М. : ФГНУ, Росинфорготех, 2004. – 148 с.
9. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А. П. – Винница : УНИВЕРСУМ – Винница, 1999. – 320 с.
10. Rotshtein A. Design and Tuning of Fussy IF – THEN Vuley for Medical Didical Diagnosis. Fussy and Neuro-Fussy Systems in Medicine (Eds: N. Teodorescu, A. Kandel, I. Lain.). USA. CRC-Press, 1998, pp. 235–295.
11. Рашкевич Ю. Використання теорії нечітких множин на наборі відцентрованих в межах пікселя зображень для вирішення задачі підвищення роздільної здатності / Ю. Рашкевич, Д. Пелешко, А. Ковальчук, Н. Куфра // *Технічні вісті*. – 2006. – № 3(24). – С. 85–88.
12. Pavlov S.V. Fuzzy expert opto-electronic system for the analysis of biomedical images (for example diagnosing glaucoma) / S.V. Pavlov, O.D. Azarov, I.R. Saldan, A.O. Rozhman, N.P. Babyuk // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : міжнародний науково-технічний журнал*. – 2013. – № 1(26). – С. 8–14.

References

1. Detlaf T. L. Razvitie osetrovyyh ryib. (Sozrevanie yaits, oplodotvorenje, razvitie zarodyishey i predlichinok) / T.L. Detlaf, A.S. Ginzburg, O.I. Shmalgauzen // М.: Nauka, 1981. 224 s.
2. Mantelman I.I. Otsenka proizvoditeley pelyadi po zhiznesposobnosti potomstva / I.I. Mantelman // *Genetika promyslovyyh ryib i ob'ektov akvakultury*. М.: Legkaya i pischevaya prom., 1983. – S.93-98.
3. Shindavina N.I. Vliyanie razlichnyh faktorov na sredniy ves ikrinok u raduzhnoy foreli / N.I. Shindavina // *Problemy i perspektivy razvitiya akvakultury v Rossii: Tez. dokl. mezhd. konf.* – Krasnodar, 2001. – S.127-128.
4. Nagler J.J. Single pair mating indicates effects on embryo survival in rainbow trout, / J.J. Nagler, J.E. Persons, J.G. Cloud // *Aquaculture*. – 2000. – Vol.184. – P.177-183.
5. A lack of consistent relationship between distribution of lipid droplets and egg quality in hatchery-raised rainbow trout / A. Ciereszko [at al.] // *Aquaculture*. – 2004. – Vol.242. – P.617-624.
6. Moiseeva E.V. Biologicheskie osnovy povyisheniya effektivnosti razvedeniya raduzhnoy foreli v usloviyah prlemennyh zavodov. Avtoref.dis.kand. biol. nauk 03.02.06 – ihtiologiya, Moiseeva Elena Vladimirovna. – Krasnodar, 2015. 23 s.
7. Lahnsteiner F. Rainbow trout egg quality determination by the relative weight increase during hardening: a practical standardization / F. Lahnsteiner, R.A. Patzner // *Journal of Applied Ichthyology*. – 2002. – Vol.18. – P.24-26.
8. Chebanov M.S., E.V. Galich E.V., Chmyr Yu.N.. Rukovodstvo po razvedeniyu i vyiraschivaniyu osetrovyyh ryib. – М., FGNU, Rosinforagroteh, 2004. – 148 s.
9. Rotshteyn A. P. Intellektualnyie tehnologii identifikatsii: nechetkie mnozhestva, geneticheskie algoritmyi, neyronnyie seti / Rotshteyn A. P. – Vinnitsa. : UNIVERSUM – Vinnitsa, 1999. – 320 s.
10. Rotshtein A. Design and Tuning of Fussy IF – THEN Vuley for Medical Didical Diagnosis. Fussy and Neuro-Fussy Systems in Medicine (Eds: N. Teodorescu, A. Kandel, I. Lain.). - USA. CRC-Press, 1998, pp. 235-295.
11. Rashkevich Yu. Vikoristannya teoriYi nechltkih mnozhin na nabori vldtsentrovanih v mezhah plksela zobrazen dlya virlshennya zadachl pldvishennya rozdlnoyi zdatnostl / Yu. Rashkevich, D. Peleshko, A. Kovalchuk, N. Kuфра // *Tehnichni visti*. – 2006. – № 3(24). – S. 85-88.
12. Pavlov S.V. Fuzzy expert opto-electronic system for the analysis of biomedical images (for example diagnosing glaucoma) / S.V. Pavlov, O.D. Azarov, I.R. Saldan, A.O. Rozhman, N.P. Babyuk // “Informatslnl tehnologiyi ta komp'yuterna Inzhenerlya”. Mizhnarodniy naukovotehlnchniy zhurnal. – 2013. – № 1(26). – S. 8–14.

Рецензія/Peer review : 11.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ СТУДЕНТА УМОВАМ НАВЧАННЯ В ОБРАНОМУ ВИЩОМУ НАВЧАЛЬНОМУ ЗАКЛАДІ

Задача визначення відповідності функціонального стану студента умовам навчання в обраному вищому навчальному закладі набуває з кожним роком все більшої актуальності, зумовленої зростанням складності і специфіки навчання, різноманітням ВНЗ і непередбачуваністю розвитку ситуації в країні. Враховуючи досить широкі адаптаційні можливості організму студента, динаміку значень норми фізіологічних показників, які можуть змінюватися в процесі навчання, час обстеження і обраний перелік контрольованих параметрів і показників стає зрозумілою складністю задачі і необхідність її розв'язання. Удосконалення методу дозволило усунути недоліки і, як результат, отримати нову якісну та адекватну оцінку відповідності ФС студента умовам навчання в обраному ВНЗ. Запропоновано метод визначення відповідності ФС студента умовам навчання у ВНЗ, побудовано та наведено логічну послідовність його етапів, кожний з яких є функціонально закінченою процедурою, з одного боку, і підґрунтям для наступного етапу – з іншого.

Ключові слова: функціональний стан студента, навчання, артеріальний тиск, навантаження.

S.M. ZLEPKO, S.V. TIMCHIK, I.O. KRYVORUCHKO

Vinnitsia National Technical University

O.S. ZLEPKO

Vinnitsia Pyrohov National Medical University

METHOD OF DETERMINING THE CORRESPONDENCE OF THE STUDENT'S FUNCTIONAL STATE TO THE CONDITIONS OF STUDY IN THE CHOSEN HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION

The task of determining the correspondence of the student's functional state to the conditions of study at a selected institution of higher education is becoming increasingly relevant due to the increasing complexity and specificity of teaching, the variety of higher education institutions and the unpredictability of the development of the situation in the country. Given the rather wide adaptive capabilities of the student's body, the dynamics of the values of the norm of physiological parameters that can change in the learning process, the time of the survey and the selected list of controlled parameters and indicators, the complexity of the problem and the need for its solution becomes clear. Improvement of the method allowed eliminating the disadvantages and, as a result, obtaining a new qualitative and adequate assessment of the correspondence of the student's FS with the conditions of study in the chosen higher education institution. The method of determining the correspondence of student FS with the conditions of studying in higher educational institutions is proposed, the logical sequence of its stages is constructed, each of which is a functionally completed procedure, on the one hand, and the grounds for the next stage - on the other.

Keywords: functional state of the student, training, blood pressure, loading.

Вступ

Задача визначення відповідності функціонального стану (ФС) студента умовам навчання в обраному вищому навчальному закладі (ВНЗ) набуває з кожним роком все більшої актуальності, зумовленої зростанням складності і специфіки навчання, різноманітням ВНЗ і непередбачуваністю розвитку ситуації в країні. Відповідно зростає і ціна помилки студента в обранні ВНЗ, як для нього особисто, так і для людей і середовища, що оточує його. При цьому важливо знати не тільки функціональний стан студента, визначений на початку навчання, необхідно мати можливість його контролю та визначення безпосередньо в процесі навчання. Враховуючи досить широкі адаптаційні можливості організму студента, динаміку значень норми фізіологічних показників, які можуть змінюватися в процесі навчання, час обстеження і обраний перелік контрольованих параметрів і показників стає зрозумілою складністю задачі і необхідність її розв'язання.

При цьому задача визначення меж індивідуальної фізіологічної норми для студента набуває ключового значення. Іншими словами, чим точніше обраховані діапазони зміни фізіологічних параметрів, в межах яких фізіологічний стан студента характеризується, як нормальний, а сам студент може бути визнаним придатним для навчання, тим менший ступінь ризику, пов'язаного з можливістю допуску до навчання людини, фізіологічний стан якої не адекватний умовам навчання у обраному ВНЗ [1].

Виклад матеріалу

Визначення меж діапазону умовної «норми», а також діапазонів адаптивної реакції організму, як з «нижньої», так і з «верхньої» межі норми являє собою складну задачу, особливо в тих випадках, коли статистичних даних для ухвалення однозначного рішення про стан здоров'я студента недостатньо. Разом з тим, міра відповідальності за прийняття рішення про допуск до навчання вимагає достовірного визначення відповідності фізіологічного стану індивідуума рівням навантаження, що мають місце в навчально-виховному процесі того чи іншого ВНЗ. Для підвищення достовірності визначення відповідності ФС студента обраним умовам навчання необхідно встановити додаткові критерії оцінки його фізіологічного стану.

Це можливо зробити за аналогією з [1], коли для кожного фізіологічного параметра межі індивідуальної норми були визначені у вигляді сукупності двох його значень (MINI) і (MAXI). Ці значення характеризують межі діапазону допустимих значень фізіологічного параметру для даного індивідуума. У тому випадку, коли хоча б одне вимірне значення фізіологічного параметру випробовуваного суб'єкта (DATA) не задовольняє умові $MINI < DATA < MAXI$, то приймається рішення про його непридатність для роботи в складних умовах. У тому випадку, якщо всі виміряні значення фізіологічного параметру випробовуваного суб'єкта (DATA) задовольняють умові $MINI < DATA < MAXI$, робиться додаткове порівняння кожного виміряного значення фізіологічного параметру (DATA) з границями групової норми адаптивної фізіологічної реакції, обмеженими максимальним (MAXI) і мінімальним (MINI) значеннями на підставі статистичної обробки даних вимірювання значень цього параметру у групи людей, що працюють в аналогічних або порівнюваних умовах [1].

Для визначення групової норми адаптивної фізіологічної реакції проводяться багаторазові вимірювання відповідних фізіологічних параметрів у групи людей, що працюють в аналогічних умовах, з подальшим обчисленням значень $MINa$ і $MAXa$ за такими формулами:

$$MINa = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MINi$$

$$MAXa = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MAXi$$

де N – число людей, що входять в групу [1].

Придатність людини для роботи в складних умовах визначають в разі, якщо для кожного виміряного фізіологічного параметру виконується умова $MINI < DATA < MAXI$, де значення MIN дорівнює максимальному з значень величин $MINi$ і $MINa$, а значення MAX одно мініимальному з значень величин $MAXi$ і $MAXa$ [1].

Але наявний підхід не забезпечує необхідного рівня достовірності та адекватності, оскільки має низку недоліків, серед яких відмітимо такі:

- відсутність можливості визначення рівня психологічної готовності працівника до роботи у відповідному середовищі;
- не завжди здається можливим зробити адекватний вибір контрольованих фізіологічних параметрів, що веде до невизначеності оцінки придатності або відповідності;
- невисока достовірність отриманих результатів, яка зумовлена тим, що відсутня прив'язка поточних (фактичних) значень фізіологічних параметрів і показників до діапазону їх належних значень.

Удосконалення методу дозволить усунути визначені недоліки і, як результат, отримати нову якісну та адекватну оцінку відповідності ФС студента умовам навчання в обраному ВНЗ.

Запропонований метод визначення відповідності ФС студента умовам навчання у ВНЗ побудуємо як логічну послідовність етапів, кожний з яких є функціонально закінченою процедурою, з одного боку, і підґрунтям для наступного етапу – з іншого.

Етап 1. Вибір первинних психофізіологічних параметрів і розрахунок вторинних показників та індексів для оцінки фізіологічного стану студентів.

Специфіка навчання студентів у ВНЗ зумовлює особливості формування сукупності параметрів, показників та індексів для оцінки їх фізіологічного стану. Зазначена сукупність повинна охоплювати функціональний стан, фізичну працездатність, психоемоційну стійкість, рівень здоров'я тощо. Саме тому, до переліку контрольованих параметрів і показників ми включили:

- Артеріальний тиск систолічний – AT_c , мм.рт.ст.
- Артеріальний тиск діастолічний – AT_d , мм.рт.ст.
- Артеріальний тиск середній – AT_{cp} , мм.рт.ст.

$$AT_{cp} = AT_g + 0,33(AT_c - AT_g)$$
- Потужність роботи лівого шлуночка серця – $W_{лш}$, Вт

$$W_{лш} = ЧСС \times (AT_c - AT_g + 100) \times (AT_c - AT_g) / 2 \times 10^6$$
- Частоту серцевих скорочень – ЧСС, уд./хв.
- Ударний індекс (УІ), мл/м².

$$OI^2 = \frac{\hat{O} \hat{E} \times S}{\times \hat{N} \hat{N}}$$

де $ХОК$ – хвилинний об'єм крові, мл/м²;

S – площа поверхні тіла (м²);

ЧСС – (уд./хв).

7. Пробу Мартіне – Кушелєвського – показник якості реакції серцево-судинної системи на навантаження – ПЯР, у.о.

$$ПЯР = (AT_{п2} - AT_{п1}) / (ЧСС_2 - ЧСС_1),$$

де AT_{n1} – пульсовий артеріальний тиск до навантаження;
 $ЧСС_1$ – частота серцевих скорочень до навантаження;
 AT_{n2} – пульсовий артеріальний тиск після навантаження;
 $ЧСС_2$ – частота серцевих скорочень після навантаження.
 8. Вегетативний тонус нервової системи – коефіцієнт Хільдебранта – КХ, у.о.

$$КХ = ЧСС / ЧД,$$

де $ЧСС$ – уд/хв;
 $ЧД$ – дих/хв.
 9. Адаптаційний потенціал (за Баєвським Р.М.) – АП, у.о.

$$АП = 0,011 \times ЧСС + 0,14 \times AT_c + 0,008 \times AT_d + 0,009 \times MT +$$

$$+ 0,014 \times B - 0,009 \times ДТ - 0,027,$$

де B – вік, роки; MT – маса тіла, кг; $ДТ$ – ріст, см.
 10. Індекс Робінсона – ІР, у.о.

$$ІР = ЧСС \times AT_c / 100,$$

де $ЧСС$ – уд/хв;
 AT_c – мм.рт.ст.
 11. Коефіцієнт витривалості – КВ, у.о.

$$КВ = \frac{ЧСС \times 100}{AT_{п}},$$

де $ЧСС$ – уд/хв;
 $AT_{п}$ – мм.рт.ст.
 12. Вегетативний індекс Кердо – ВІ, у.о. [2]

$$ВІ = (1 - \frac{AT_d}{ЧСС}) \times 100,$$

де $ЧСС$ – уд/хв;
 AT_d – мм.рт.ст.
 13. Хвилиний об'єм кровообігу – ХОК, л/хв. [2]

$$ХОК = УО \times \frac{ЧСС}{100},$$

де $УО$ – ударний об'єм, що визначається за модифікованою формулою Старра:

$$УО = (90,97 + 0,54 \times AT_{п} - 0,57 \times AT_d - 0,61 \times B) \times K,$$

де K – коефіцієнт вікового періоду: I період (чоловіки 21–35 років, жінки 20–35 років) – $K = 1,25$; II період (чоловіки 36–60 років, жінки 36–55 років) – $K = 1,55$; III період (чоловіки 61–75 років, жінки 56–75 років) – $K = 1,7$. $УО$ при цьому є достовірним при умові: $ЧСС = 60-90$ уд/хв, $AT_c = 105-155$ мм.рт.ст., $AT_d = 55-95$ мм.рт.ст. [3].

14. Максимальне споживання кисню – МСК, л/хв (формула Карпмана) для тренуваних людей [4].

$$МСК = 2,2 \times PWC_{170} + 1070$$

Більш точна формула (Карпман В.П., Гудков І.А., Койдинова Г.А.) [5]:

$$МСК = 3,5 \times \exp[-5 \exp \times (1 - 2PWC_{170})] + 2,6,$$

де PWC_{170} – потужність м'язової роботи.
 15. Субмаксимальний тест – PWC_{170} [4]:

$$PWC_{170} = W1 + (W2 - W1) \times \frac{170 - f1}{f2 - f1},$$

де PWC_{170} – потужність фізичного навантаження на велоергометрі (кг/хв), при якій досягається тахікардія в 170 уд/хв;

$W1$ і $W2$ – потужність 1 і 2 навантажень в кг/хв;

$f1$ і $f2$ – $ЧСС$ в кінці 1 і 2 навантажень.

16. Індекс Гарвардського степ – тесту – ІГСТ [4].

$$ІГСТ = \frac{t \times 100}{(f1 + f2 + f3) \times 2},$$

де t – час підйому на сходинку;

$f1, f2, f3$ – сума пульсу за перші 30 секунд на другій, третій і четвертій хвилині (уд/хв).

Етап 2. Визначення і встановлення границь (меж) діапазонів індивідуальної фізіологічної норми та діапазонів відхилень поточних значень від належних для параметрів, показників та індексів, вибраних на етапі 1.

Наведемо основні показники кровообігу та їх фізіологічні коливання (відхилення).

Характеристика кровообігу та фізіологічні відхилення

Позначення	Характеристика	Фізіологічні коливання (відхилення)
1	2	3
ХОК	Хвилинний об'єм кровообігу	5 – 7 л/хв
СІ	Серцевий індекс	2,5 – 3,5 л/хв×м ²
УО	Ударний об'єм	70 – 80 мл
ЧПК	Час повного кровообігу крові	40 – 69 с
ЧСС	Частота серцевих скорочень	60 – 80 уд/хв
РЛШ	Робота лівого шлуночка	6 – 7 кг/хв
ОЦК	Об'єм крові, що циркулює	65 – 70 мл/кг
АТс	Середній артеріальний тиск	90 – 95 мм.рт.ст.
ЦВТ	Центральний венозний тиск	6 – 12 мм.вод.ст.
ЗПОС	Загальний периферичний опір судин	1200 – 2500 дін ⁻¹ -с см ⁻⁵ см ²

Більшість належних показників гемодинаміки вираховується, виходячи з базової формули Савицького М. М. [6] щодо належного хвилинного об'єму крові.

$$\hat{I} \hat{O} \hat{E} = \frac{\hat{I} \hat{I} \hat{I}}{281} \frac{\hat{e}}{\hat{\delta} \hat{a}},$$

де НОО – належний основний обмін, який розраховується за формулами (таблицями) Харріса – Бенедикта, з урахуванням того, що основний обмін залежить від статі, віку і маси тіла [7]: для чоловіків – НОО (ккал) = 13,75×МТ + 5ДТ – 6,75×В + 66,77; для жінок – НОО (ккал) = 6,56×МТ + 1,85ДТ + 4,67×В + 65,09; МТ – (кг), ДТ – (см), В – (роки).

В реальних умовах Антоновим А. А. запропоновано використовувати середні значення, які на 20 % вище тих, що вираховуються.

Патологією вважається відхилення фактичних (поточних) значень від належних більше ніж на 15 – 20 %.

Наведемо для параметрів, які обрані для контролю і вимірювання, значення норми їх належні значення та допустимі фізіологічні відхилення:

ЧД_{норма} = 16 – 20 дих/хв – частота дихання;

ДО_{норма} = 300 – 900 мл (в середньому 500 мл) – дихальний об'єм;

ХОД = ЧД × ДО л – хвилинний об'єм дихання;

ХОД_{норма} = 4 – 10 л (в середньому 5л);

РД_{норма} = 70 – 80 л – резерв дихання;

РД_{норма} = 85 – 95 % МВЛ.

При РД < 60 – 55 % і нижче – діагностується дихальна і серцева недостатність.

1. Відхилення АТс і АТд (поточні значення) від належних.

1.1 Для АТс:

а) чоловіки $\Delta АТс = АТс(поточне) - (91 + 0,5 \times В + 0,1 \times МТ)$;

б) жінки $\Delta АТс = АТс(поточне) - (88 + 0,7 \times В + 0,15 \times МТ)$;

1.2 Для АТд:

а) чоловіки $\Delta АТд = АТд(поточне) - (58 + 0,1 \times В + 0,15 \times МТ)$;

б) жінки $\Delta АТд = АТд(поточне) - (62 + 0,17 \times В + 0,1 \times МТ)$;

В – вік, роки; МТ – маса тіла, кг;

Норма – діапазон відхилень – 0 – 30 мм.рт.ст. для АТс і АТд.

2. Діапазон норми тесту Вотйала-Тіффно (ТВ-Т).

ТВ-Тн = 70 – 90 %, якщо < 70 % – діагностується наявність патології.

3. Діапазон норми об'ємів серця.

V_C^H : чоловіки – 720 – 800 см³; жінки – 540 – 620 см³.

4. Діапазон норми показника якості реакції – 0,5 – 1,0 у.о.

5. Відхилення поточного значення ЖЄЛ (життєвої ємності легень) від належного, %.

$$\Delta ЖЄЛ = \left(\frac{ЖЄЛ_{поточне} - ЖЄЛ_{належне}}{ЖЄЛ_{належне}} \right) \times 100$$

В нормі значення не може відхилитися від належного більше ± 15 %.

Діапазон ЖЄЛ_{належне} для дорослих тренуваних людей:

а) чоловіки: $ЖЄЛ_{належне} = (27,63 - 0,122 \times В) ДТ$, мл;

б) жінки: $ЖЄЛ_{належне} = (21,68 - 0,101 \times В) ДТ$, мл.

В – вік, роки; ДТ – довжина тіла, см.

6. Належне значення МВЛ (максимальна вентиляція легень) – МВЛ_{належне}.

Формула Пібоді в модифікації А. Г. Дембо:

a) $MВЛ_{належне} = 11,5 \times ЖЄЛ_{поточне}$ – для осіб молодше 45 років;

b) $MВЛ_{належне} = 17,5 \times ЖЄЛ_{поточне}$ – для осіб старше 45 років.

$MВЛ_{норма} = 50 - 180$ л/хв. Відхилення $MВЛ$ від $MВЛ_{належне}$ не більше $\pm 25\%$.

Етап 3. Формування границь (меж) діапазонів фізіологічної норми шляхом визначення сукупності 2

– ох крайніх значень параметра, показника, індекса $P_{i доп}^H, P_{i доп}^B$, що характеризують нижню і верхню границі (межі) діапазону допустимих значень кожного параметра, показника, індексу, які беруть участь в процесі оцінювання фізіологічного стану студентів.

Етап 4. Оцінювання психоемоційного статусу і типу особистості студентів ВНЗ.

4.1 Проходження психологічного тесту «Визначення типу особистості» Дж. Олдхем і Л. Морріс (адаптована версія Злепка С. М. і Коваля Л. Г.) [6].

4.2 Обчислення поточного типологічного профілю особистості (ПТП).

4.3 Порівняння поточного типологічного профілю особистості із зразковим (ЗТП), що зберігається в відповідній базі даних (БД) комплексу.

4.4 Визначення рівня психологічної готовності конкретного студента шляхом обчислення кореляції між ПТП і ЗТП, значення якої і буде відповідати фактичному рівню психологічної готовності студента умовам навчання в обраному ВНЗ.

$$P_{ПТП} = \begin{cases} 0,75 \div 1 - \text{високий} - \text{відповідає повністю, без обмежень} \\ 0,5 \div 0,74 - \text{середній} - \text{відповідає частково, є обмеження} \\ < 0,49 - \text{низький} - \text{практично не відповідає} \end{cases} \quad (1)$$

Етап 5. Вимір та обчислення фізіологічних параметрів, показників та їх індексів, тобто, отримання поточних значень P_i .

Етап 6. Перевірка відповідності поточних значень вимірювань та обчислення параметрів і показників діапазонам індивідуальної фізіологічної норми (етап 3), тобто:

$$P_{i доп}^H < P_i < P_{i доп}^B$$

При невиконанні умови (2) хоча б по одному параметру, студент потребує додаткового обстеження лікарем або в умовах ЗОЗ і тільки за його результатами робиться остаточний висновок.

Етап 7. Додаткова прив'язка відповідності поточних значень P_i діапазону значень норми адаптивної фізіологічної реакції P_a^H і P_a^B , отриманому за результатами статистичної обробки даних вимірювань у групи студентів, що навчаються в аналогічних умовах, тобто:

$$P_{i a}^H < P_i < P_{i a}^B$$

здійснюється для кожного студента, для якого виконується умова (2) по всіх контрольованих параметрах, показниках, індексах.

Етап 8. Для поточних значень фізіологічних параметрів, показників та індексів, по яких відсутні адекватні діапазони індивідуальної фізіологічної норми проводиться додаткова перевірка їх відповідності діапазонам належних значень, тобто:

$$P_{i нал}^H < P_i < P_{i нал}^B$$

Етап 9. Рівень відповідності функціонального стану студента умовам навчання в обраному ВНЗ визначається сукупністю параметрів, показників та індексів для оцінки його фізіологічного стану, кожен із яких відповідає умові:

$$R_B = \left\{ \begin{array}{l} P_{i доп}^H < P_i < P_{i доп}^B \quad (2) \\ P_{i a}^H < P_i < P_{i a}^B \quad (3) \\ P_{i нал}^H < P_i < P_{i нал}^B \quad (4) \end{array} \right\} \text{високий} - \text{відповідає повністю, без обмежень}$$

Для функціонального стану в цілому.

$$R_B^\Sigma = \sum_{i=1}^N \left(\begin{array}{l} P_{ПТП} = \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \div 1 - \text{високий} \\ 0,5 \div 0,74 - \text{середній} \end{array} \right\} \quad (1) \\ P_{i доп}^H < P_i < P_{i доп}^B \quad (2) \\ P_{i a}^H < P_i < P_{i a}^B \quad (3) \\ P_{i нал}^H < P_i < P_{i нал}^B \quad (4) \end{array} \right) \text{високий} - \text{відповідає повністю без обмежень}$$

Середній рівень (відповідає частково, є обмеження) визначається, як такий, при якому умова (5) не виконується повністю або частково із-за невиконання хоча б однієї з умов (2–4), а умова (6) – відповідно – умов (1–4), що потребує додаткового обстеження або уточнення причин їх невиконання. В такій ситуації остаточне рішення приймає декан після консультації з лікарем і бесіди з студентом.

Низький рівень (практично не відповідає) визначається як такий, за якого умови (5), (6) не виконуються повністю із-за невиконання як мінімум двох з чотирьох умов (1–4). В такій ситуації студент потребує обстеження або лікування в установах ЗОЗ.

Висновки: Особливістю удосконаленого методу визначення відповідності студентів умовам навчання є те, що він, по-перше, дозволяє своєчасно, поки вони не набули ознак патологічних, виявити і зафіксувати ознаки втоми, неадекватної поведінки, зниження працездатності; по-друге, дає можливість відслідковувати ті остаточні явища навантаження, які стимулюють і мотивують досягнення нового, більш високого і стабільного рівня відповідності; по-третє, забезпечує скорочення термінів (без погіршення якості) раннього і пізнього відновлення ФС і здоров'я в цілому.

Література

1. Патент RU 2339308. Способ определения пригодности человека для работы в сложных техногенных условиях / Лунев В. Н., Туминас К. Б.
2. Пирогова Е. А. Влияние физических упражнений на работоспособность человека / Е. А. Пирогова, Л. Я. Иващенко, Н. П. Страпко. – К. : Здоровья, 1986. – 152 с.
3. Использование неинвазивных методов определения показателей центральной гемодинамики в предоперационной подготовке [Электронный ресурс]. – Режим доступа : articlez.com/article/6324
4. Савицкий Н. Н. Биофизические основы кровообращения и клинические методы изучения гемодинамики / Н. Н. Савицкий. – Л. : Медицина, 1974. – 311 с.
5. Виноградова Т. С. Инструментальные методы исследования сердечно-сосудистой системы : справочник / под ред. Т. С. Виноградовой. – М. : Медицина, 1986. – 416 с.
6. Карпман В. Л. Спортивная медицина : учебник для ин-ов физической культуры / под ред. В. Л. Карпмана. – М. : Физкультура и спорт, 1987. – 304 с
7. Параметры центральной гемодинамики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://xn-80ahc0abogjs.com/terapiya-anesteziologiya-intensivnava/parametrvi-tsentralnoy-gemodinamiki.html>

References

1. Patent RU 2339308. Sposob opredeleniya pryhodnosti cheloveka dlia roboty v slozhnykh tekhnohennykh uslovyakh / Lunev V. N., Tumynas K. B.
2. Pyrohova E. A. Vliyanye fyzycheskykh uprazhneniy na rabotosposobnost cheloveka / E. A. Pyrohova, L. Ya. Yvashchenko, N. P. Strapko. – K. : Zdorovia, 1986. – 152 s.
3. Yspolzovanye neynvazyvnykh metodov opredeleniya pokazatelei tsentralnoi hemodynamyky v predoperatsyonnoi podgotovke [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : articlez.com/article/6324
4. Savitskiy N. N. Byofyzycheskye osnovy krovoobrashcheniya y klynycheskye metody yzucheniya hemodynamyky / N. N. Savitskiy. – L. : Medytsyna, 1974. – 311 s.
5. Vynogradova T. S. Ynstrumentalnye metody yssledovaniya serdechno-sosudystoi systemy : spravochnyk / pod red. T. S. Vynogradovoi. – M. : Medytsyna, 1986. – 416 s.
6. Karpman V. L. Sportyvnaia medytsyna : uchebnyk dlia yn-ov fyzycheskoi kultury / pod red. V. L. Karpmana. – M. : Fyzkultura y sport, 1987. – 304 s
7. Parametryi tsentralnoi hemodynamyky [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://xn-80ahc0abogjs.com/terapiya-anesteziologiya-intensivnava/parametrvi-tsentralnoy-gemodinamiki.html>

Рецензія/Peer review : 20.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

УДК 621.396.662

А.А. ТАРАНЧУК, С.К. ПІДЧЕНКО, Р.П. ХОПТИНСЬКИЙ, Л.І. ПІЗНЮР

Хмельницький національний університет

МОДЕЛЬ КВАРЦЕВОГО ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ

Побудована імітаційна модель двочастотного кварцового опорного генератора систем синхронізації цифрового телебачення стандартів DVD-S2, DVD-T2. В системі MATLAB/Simulink проведено моделювання роботи опорного кварцового генератора в двочастотному режимі збудження з використанням кварцового резонатора Ат-зрізу. Представлені результати аналізу впливу температурних дестабілізуючих факторів на стабільність генеруємих сигналів.

Ключові слова: цифрове телебачення, системи синхронізації, кварцовий резонатор, Ат-зріз, опорний генератор, двочастотний режим збудження, імітаційна модель.

A.A. TARANCHUK, S.K. PIDCHENKO, R.P. KHOPTINSKIY, L.I., PIZNIUR
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

REFERENCE QUARTZ OSCILLATOR MODEL OF DIGITAL TELEVISION SYNCHRONIZATION SYSTEMS

The simulation model of the dual-frequency quartz reference oscillator for digital TV synchronization systems of standards DVD-S2, DVD-T2 was constructed. In the MATLAB / Simulink system, the simulation of the reference quartz crystal oscillator in a two-frequency excitation mode using a quartz crystal resonator AT-cut was performed.

The simulation of the reference oscillator for an AT-cut quartz resonator its excitation at two frequencies (81,9 MHz and 76,69 MHz) was carried out. It was found that the frequency difference component is practically linear dependence on the temperature with the steepness $-30 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ of the temperature-frequency transformation, which makes it possible to identify with high accuracy the thermal state of the QR. In turn, the application of the multi-frequency algorithmic method of compensating for temperature instability reduces the relative instability of a quartz crystal oscillator from $2.5 \cdot 10^{-6}$ to $6.25 \cdot 10^{-7}$ in a wide temperature range. This makes it possible to increase the accuracy of the synchronization of the receiving and transmitting equipment of digital television systems.

The results of the analysis of the influence of temperature destabilizing factors on the stability of the oscillated signals are presented.

Keywords: digital television, synchronization systems, quartz crystal resonator, AT-cut, reference oscillator, dual-frequency excitation mode, simulation model.

Вступ

Підвищення стабільності систем синхронізації цифрового телебачення, яке впроваджуються в Україні у відповідності до європейських стандартів другого покоління DVD-S2, DVD-T2 є одним з важливих завдань телекомунікацій. Вимоги до точності синхронізації прийомо-передавальної апаратури систем цифрового телебачення постійно зростають паралельно з розвитком систем і мереж телекомунікацій. Точність синхронізації впливає практично на всі основні параметри системи, такі як чутливість, вибірковість, завадозахищеність, наявність шумів, виникнення міжсимвольної інтерференції (МСІ) та спотворених каналів. Тому, стабільності джерел сигналів синхронізації цифрових систем за різних умов їх експлуатації приділяється велика увага [1, 2].

При виборі генераторів сигналів синхронізації вельми важливими є і інші їх характеристики, зокрема масо-габаритні, потужність споживання, надійність та вартість. Одним із перспективних підходів до побудови високостабільних джерел опорного сигналу систем синхронізації цифрового телебачення є застосування багаточастотних кварцових генераторів з цифровим керуванням [3, 4].

Постановка завдання

Ефективність передачі та прийому сигналу в системах цифрового телебачення залежить від точності синхронізації приймача і передавача у часі, за частотою і фазою (у разі когерентного прийому). Використання мультиплексування з частотним поділом каналів [5] (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing – OFDM) в системах цифрового телебачення і підвищена чутливість сформованих підносійних OFDM-сигналів до частотної неузгодженості і флуктуацій фази опорних генераторів передавача і приймача вимагає високої точності їх синхронізації. Найбільш помітним зовнішнім фактором, що впливає на стабільність частоти генератора і, як наслідок викликає зрив синхронізації в системах телебачення, є зміна температури навколишнього середовища [2]. Тому підвищенню температурної стабільності джерел сигналів синхронізації приділяється найбільша увага.

У цей час, найбільш стабільними джерелами частоти в декаметровому діапазоні хвиль є квантові стандарти частоти (водневі, рубідієві, цезієві). Однак, вони мають великі габарити та вагу, велику потужність споживання, а також значний час виходу на режим стабілізації (десятки, сотні хвилин). Це обмежує область їх використання стаціонарною апаратурою в якості високостабільних первинних і вторинних джерел частоти [6].

У діапазоні сантиметрових хвиль найбільшу стабільність мають генератори на надпровідних сапфірових резонаторах. Їх основним недоліком є необхідність підтримки криогенних температур, що обумовлює високу вартість та великі габарити за рахунок використання складних комплексів підтримки стабільних умов експлуатації [7].

Наступне місце за стабільністю частоти займають генератори із кварцовими резонаторами. Оскільки

такі генератори зазвичай входять складовою частиною у квантові стандарти частоти, то вони уступають останнім тільки за довгочасною стабільністю, що в ряді випадків за умови періодичної корекції частоти є несуттєвим. Однак, за експлуатаційними параметрами (габарити, вага, споживана потужність, вартість) кварцові генератори набагато перевершують квантові стандарти частоти, що й визначило їхнє широке поширення в апаратурі радіотехніки та телекомунікацій в якості вторинних еталонів частоти [8, 9].

Тактові генератори мають найменші габарити, споживану потужність і час готовності, однак у них не використовуються схеми компенсації впливу зміни температури зовнішнього середовища, тому вони мають найгіршу температурну стабільність частоти, що обмежує їхню область застосування.

У термостатованих генераторах усунення основного дестабілізуючого фактора - впливу температури навколишнього середовища на частоту генератора досягається шляхом термостатування кварцового резонатора, або одного п'єзоелемента, споживана потужність таких генераторів складає порядку 0,25 Вт при часі встановлення частоти від 30 до 180 секунд [3, 8]. Більшість серійних термостатованих генераторів мають споживану потужність у стаціонарному режимі 1-3 Вт і час установлення частоти від 15 до 90 хвилин [8].

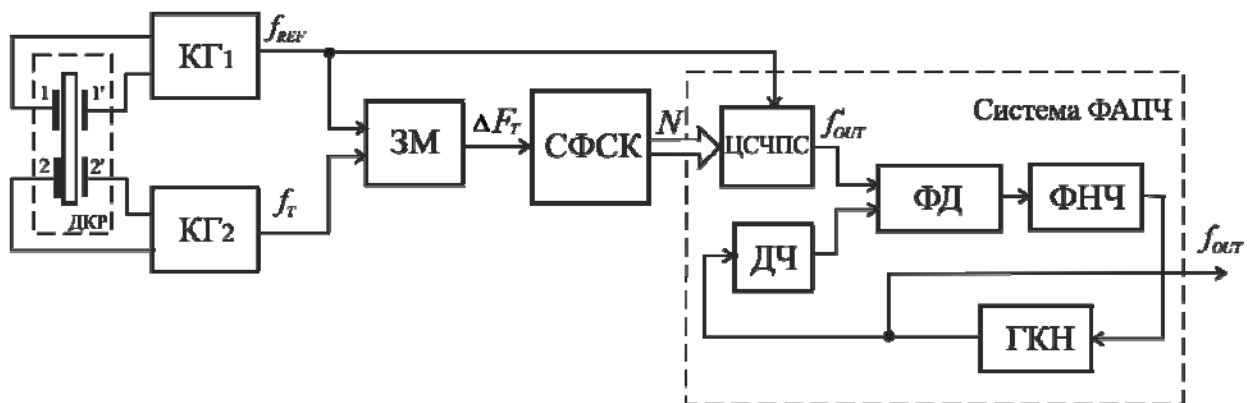
Серед термокомпенсованих кварцових генераторів найкращу температурну і довгочасну стабільності мають термокомпенсовані кварцові генератори із цифровою термокомпенсацією, схема сигналу компенсації яких побудована на основі двочастотного генератора з цифровим керуванням за допомогою синтезатора частоти [10, 12, 13].

Незважаючи на велику кількість робіт, в яких висвітлені проведені дослідження в області підвищення температурної стабільності частоти коливальних [3–5, 11], питання впливу дестабілізуючих факторів на стабільність опорних генераторів потребують подальшого вивчення. Вирішення цих питань тісно пов'язане з проектуванням, або модернізацією систем синхронізації цифрового телебачення стандартів DVD-S2, DVD-T2 та з удосконаленням приймально – передавальної апаратури її трактів.

Метою роботи є побудова моделі опорного термокомпенсованого кварцового генератора систем синхронізації цифрового телебачення стандартів DVD-S2, DVD-T2 в середовищі MATLAB/Simulink та дослідження його характеристик в умовах зовнішніх температурних дестабілізуючих впливів.

Основний розділ

Структурна схема запропонованого опорного двочастотного термокомпенсованого генератора (ДТКГ) з цифровим керуванням наведена на рис. 1. В даному генераторі (рис. 1) реалізований багаточастотно-алгоритмічний метод забезпечення технічної інваріантності п'єзорезонансних пристроїв, що дозволяє суттєво підвищити (до одного – двох порядків) стабільність генерування опорної частоти $f_{оп}$ [10].



ДКР – двочастотний кварцовий резонатор; КГ1, КГ2 – кварцовий генератор1,2;
ЗМ – змішувач; СФСК – схема формування сигналу компенсації; ЦСЧПС – цифровий синтезатор частоти прямого синтезу;
ФД – фазовий детектор; ФНЧ – фільтр нижніх частот; ГКН – генератор керований напругою; ДЧ – дільник частоти
Рис. 1. Структурна схема ДТКГ

Структура ДТКГ містить наступні блоки (рис. 1): двочастотний кварцовий резонатор ДКР з двома парами електродів 1-1' і 2-2' підключений до активних частин кварцових генераторів КГ1 і КГ2. На виході першого кварцового генератора КГ1 формуються коливання опорної моди КР f_{REF} , а другий кварцовий генератор КГ2 призначений для формування коливань термочутливої (допоміжної) моди коливань f_T [3].

Залежності власних резонансних частот КР при малих відхиленнях $\Delta T = T - T_0$ від номінальної температури T_0 можна представити як

$$f_{оп}(T) = f_{оп}^0 + a_{1T}\Delta T; f_T = f_T^0 + a_{2T}\Delta T, \quad (1)$$

де f_{REF}^0, f_T^0 – номінальні значення частот на виході КГ 1 і КГ 2 при температурі $T = T_0$; a_{1T}, a_{2T} – коефіцієнти термочутливості.

На виході змішувача ЗМ формується коливання різницевої частоти

$$F(T) = F_0 + \Delta F(T) = \left[f_{OП}^0 - \frac{k_1}{k_2} f_T^0 \right] + \left[a_{1T} - \frac{k_1}{k_2} a_{2T} \right] \Delta T, \quad (2)$$

де $\frac{k_1}{k_2}$ – коефіцієнт дробово-раціонального перетворення частоти f_T , що обирається за умови

$f_{REF}^0 \approx \frac{k_1}{k_2} f_T^0$. Коливання різницевої частоти $F(T)$ використовується для ідентифікації теплового стану

п'єзоелемента двочастотного КР 1 і компенсації його температурної нестабільності.

Схема формування сигналу компенсації СФКС формує коригувальний код $N(T)$, що забезпечує компенсацію зсувів частоти f'_{OUT} на виході цифрового синтезатора прямого синтезу ЦСЧПС через температурні зсуви частоти опорного коливання $f_{REF}(T)$:

$$N(T) = N_0(f_{OUT}, f_{REF}^0) + \Delta N(\Delta F(T)), \quad (3)$$

де $N_0(f_{OUT}, f_{REF}^0) = \frac{f_{OUT} \cdot 2^m}{f_{REF}^0}$ – номінальне значення коригувального коду для температури $T = T_0$;

m – розрядність керуючого слова $N(T)$.

Термокомпенсоване коливання із частотою f'_{OUT} з виходу цифрового синтезатора надходить на схему системи ФАПЧ, що містить фазовий детектор ФД, фільтр низької частоти ФНЧ, дільник частоти ДЧ і генератор керований напругою ГКН (рис. 1), де частота вихідного сигналу кварцового генератора $f_{OUT} = n \cdot f'_{OUT}$, визначається коефіцієнтом ділення частоти n дільника ДЧ [10].

Для дослідження характеристик стабільності опорного генератора систем синхронізації цифрового телебачення в середовищі MATLAB/Simulink [12] побудована модель (рис. 2,а), у відповідності до принципу побудови двочастотних кварцових генераторів з цифровою термокомпенсацією [10].

Модель включає в себе ЦСЧПС на базі 32-х розрядної мікросхеми синтезатора частоти (наприклад, AD9851) [13] і систему компенсації відхилення частоти опорного коливання. За допомогою змінних у вікні Model Workspace (рис. 2,б) задаються номінальні значення частот $f_{OП}^0 = 81,9$ МГц та $f_T^0 = 76,69$ МГц першої та третьої моди коливання ДТКГ АТ- зрізу, нижня та верхня границі температурного діапазону $T_{min} = -35$ °C і $T_{max} = 80$ °C, загальний час симуляції $T_s = 1$ с, вихідна частота генератора $f_{OUT} = 10$ МГц. Температурно-частотні характеристики $\Delta f_{OП}^0$ та Δf_T^0 двочастотного генератора опорних коливань задані за допомогою блоків SIMULINK моделі (рис. 4, а) Polinomial та Polinomial 1, відповідно, і представлені апроксимованими залежностями у вигляді поліномів третього ступеня

$$\frac{\Delta f_j(T)}{\Delta f_{0j}} = [c1 \ c2 \ c3 \ c4] \begin{bmatrix} T^3 \\ T^2 \\ T^1 \\ T^0 \end{bmatrix},$$

де $c1 - c4$ – коефіцієнти, які задані за допомогою матриць: PolyCf1=[0,0079 -0,6696 7,877 78,2626] та PolyCf2=[0,0078 -0,6586 -23,1335 889,411].

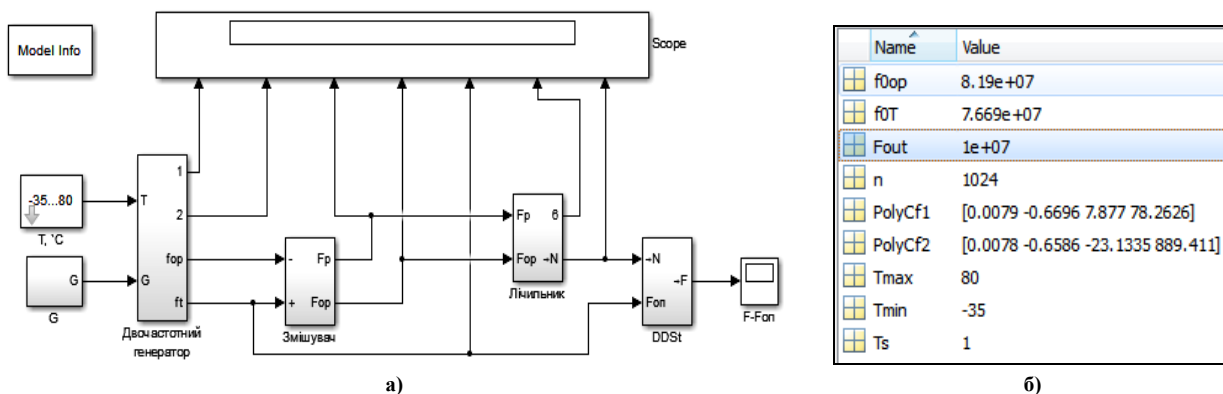


Рис. 2. Імітаційна модель опорного ДТКГ (а) та вікно Model Workspace (б)

На рис. 3–6 представлені основні елементи моделі опорного генератора, яка складається з двочастотного термокомпенсованого кварцового генератора (ДТКГ) (рис. 3,а), змішувача (рис. 4,а); схеми

СФКС (рис. 5,а); синтезатора частоти прямого синтезу (рис. 6). Значення опорних частот f_{OP} та f_T формуються в моделі SIMULINK у блоках «To Workspace» та «To Workspace 1», відповідно (рис. 3,а). Контроль отриманих температурно-частотних характеристик ТЧХ Δf_{OP}^0 та Δf_T^0 здійснюється на виходах 1 та 2. На виході змішувача (рис. 4,а) у відповідності до (2) формується коливання різницевої частоти ΔF . В схемі формування сигналу компенсації (рис. 5, а) формується коригувальний код ΔN у відповідності до (3), що забезпечує компенсацію зсувів частоти $\Delta F(f_{OUT})$ на виході цифрового синтезатора прямого синтезу (рис. 6) через температурну нестабільність опорного коливання $f_{OP}(T)$.

Результати моделювання складових опорного двочастотного кварцового генератора квадратурного демодулятора наведені на рис. 3,а – рис. 5,а.

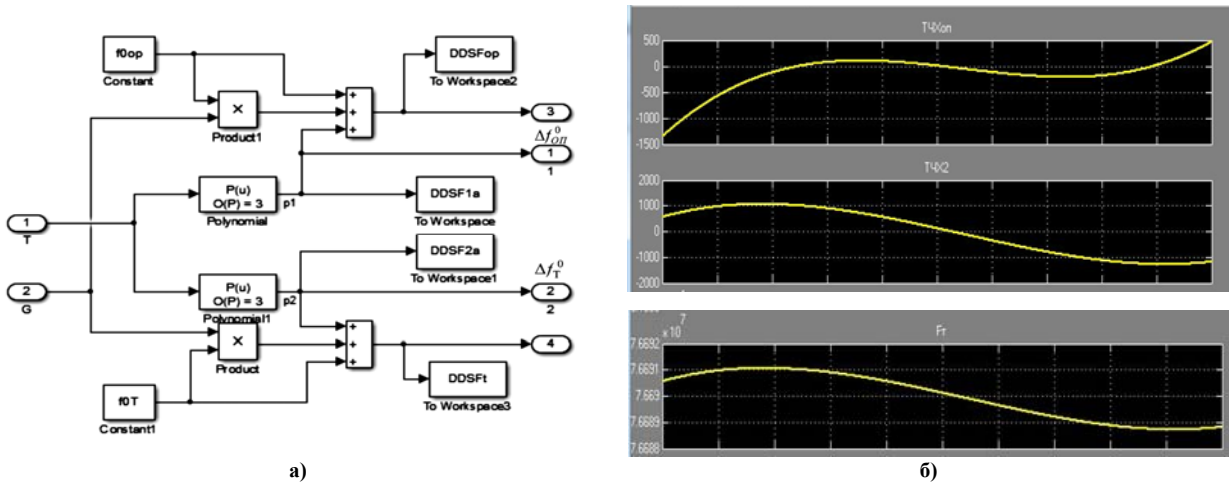


Рис. 3. Модель ДТКГ (а) та його ТЧХ Δf_{OP}^0 , Δf_T^0 (виходи 1 та 2) і сигнал температурної моди f_T (блок Constant1) (б)

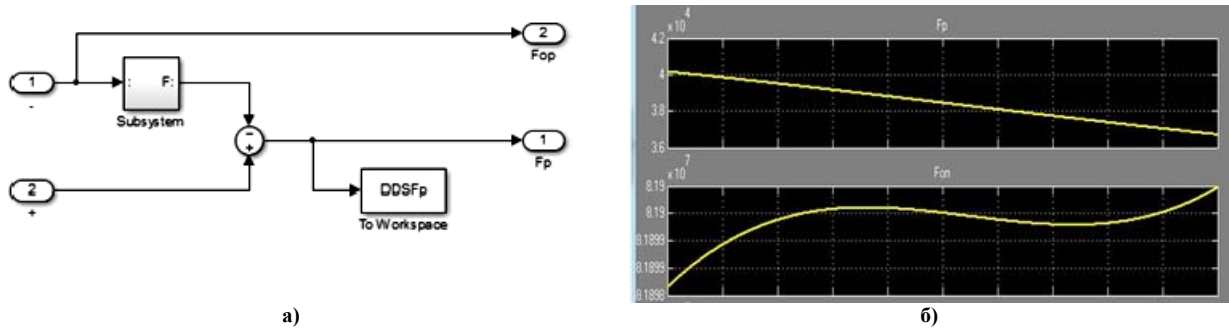


Рис. 4. Модель змішувача (а) та сигнали опорної частоти f_{OP} та різницевого коливання F_p (виходи 1 та 2) (б)

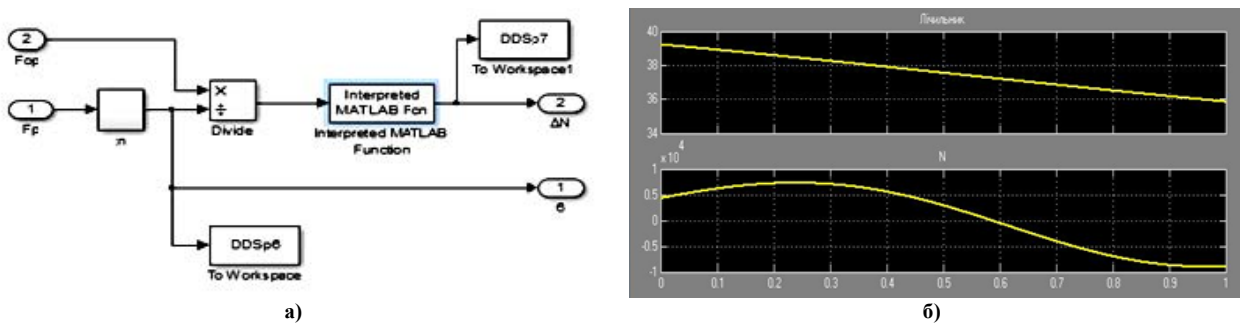


Рис. 5. Модель СФКС (а) та сигнал на виході лічильника і коригувальний код ΔN (вихід 1 та 2) (б)

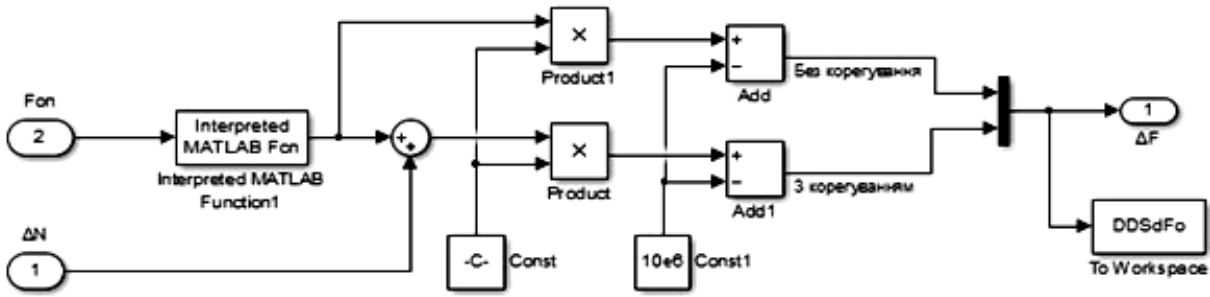


Рис. 6. Модель синтезатора частоти прямого синтезу

Типові ТЧХ кварцового резонатора Ат-зрізу ($f_{OP}^0 = 81,9$ МГц, $f_T^0 = 76,69$ МГц) при його збудженні на двох частотах представлені на рис. 5, де $\Delta f_{OP}/f_{OP}^0$, $\Delta f_T/f_T^0$ – відносні зсуви частот КР Ат-зрізу у двочастотному режимі збудження, а на рисунку 6 – абсолютні зміни опорної й різницевої частот $\Delta f_{OP}(T)$, $\Delta F(T)$, компенсуючої залежності $\Delta f_{COMP}(T)$, і вихідної частоти $\Delta f_{OUT}(T)$ (криві 1,2,3,4, відповідно). Видно (рис. 5), що різницева складова ΔF носить практично лінійну залежність від температури із крутістю перетворення температура-частота $S_{FT} \approx 30$ Гц/°С.

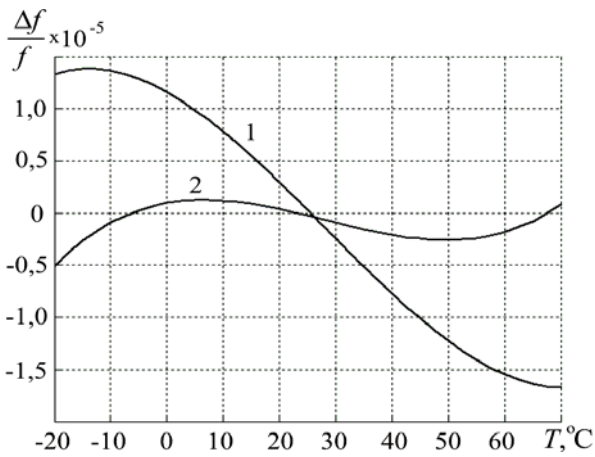


Рисунок 7 – Типові ТЧХ кварцового резонатора Ат-зрізу: відносні зсуви частот КР $\Delta f_{OP}/f_{OP}^0$ (крива 1) та $\Delta f_T/f_T^0$ (крива 2)

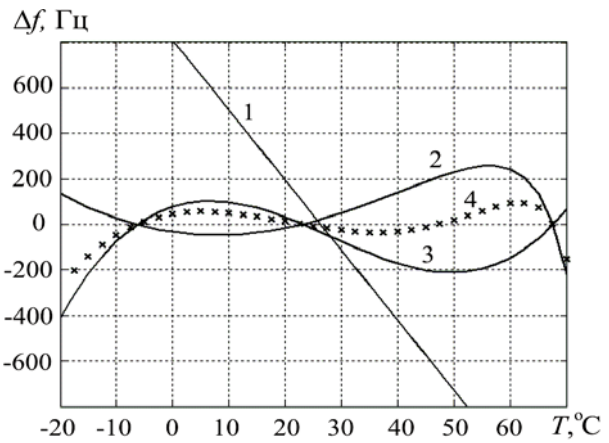


Рисунок 8 – Абсолютні зміни опорної й різницевої частот $\Delta f_{OP}(T)$, $\Delta F(T)$, компенсуючої залежності $\Delta f_{COMP}(T)$, і вихідної частоти $\Delta f_{OUT}(T)$ (криві 1,2,3,4, відповідно)

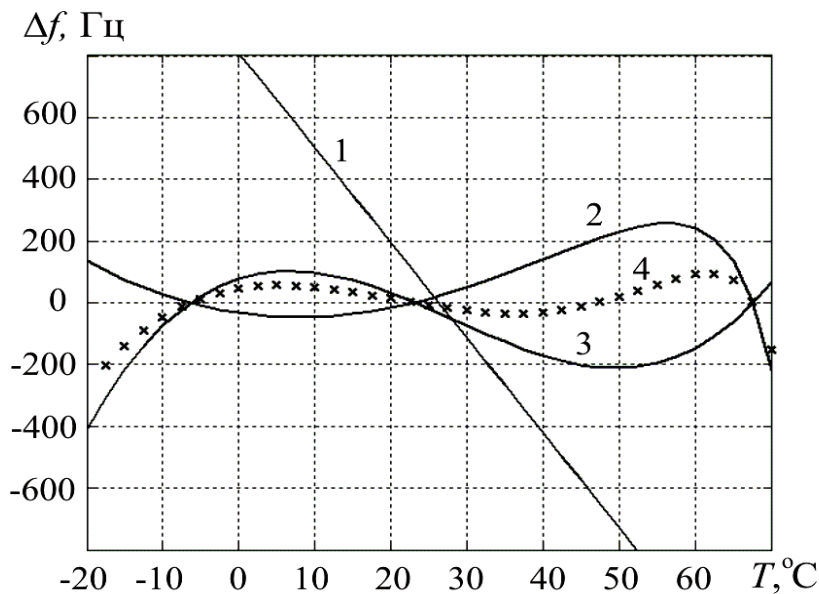


Рис. 8. Абсолютні зміни опорної й різницевої частот $\Delta f_{OP}(T)$, $\Delta F(T)$, компенсуючої залежності $\Delta f_{COMP}(T)$, і вихідної частоти $\Delta f_{OUT}(T)$ (криві 1-4, відповідно)

Компенсуюча залежність $\Delta f_{COMP}(T)$, еквівалентна зміні коригувального $\Delta f_{COMP}(T) : \Leftrightarrow \Delta N(\Delta F)$ коду, отримана шляхом заповнення періоду різницевої F частоти з коефіцієнтом $n_F = 1024$ розподілу імпульсами опорної f_{OP} частоти. Аналіз отриманих результатів (рис. 6) показує, що застосування багаточастотно-алгоритмічного методу компенсації температурної нестабільності дозволяє знизити відносну нестабільність кварцового генератора з $2,5 \cdot 10^{-6}$ до $6,25 \cdot 10^{-7}$ в діапазоні температур від -10°C до 50°C . Максимальна ефективність компенсації для даної форми амплітудно- частотної характеристики досягається в діапазоні температур $T \in [20, 50]^\circ\text{C}$ [3, 10].

Висновки

Побудована імітаційна модель опорного генератора систем синхронізації цифрового телебачення стандартів DVD-S2, DVD-T2, з використанням прямого цифрового синтезу для формування стабільних опорних сигналів з компенсацією температурних похибок встановлення частоти шляхом двочастотного збудження п'єзоколивальної системи опорного генератора та з поточною ідентифікацією параметричного стану резонатора. Проведено аналіз впливу температурних дестабілізуючих факторів на похибки формування опорних сигналів. Проведене моделювання в системі MATLAB/Simulink роботи опорного генератора для кварцового резонатора АТ-зрізу при його збудженні на двох частотах ($f_{REF}^0 = 81,9$ МГц, $f_T^0 = 76,69$ МГц). Виявлено, що різницева складова ΔF носить практично лінійну залежність від температури із крутизною перетворення температура-частота $S_{FT} \approx -30$ Гц/ $^\circ\text{C}$, що надає можливість з високою точністю ідентифікувати тепловий стан кварцового резонатора. В свою чергу застосування багаточастотно-алгоритмічного методу компенсації температурної нестабільності дозволяє знизити відносну нестабільність кварцового генератора з $2,5 \cdot 10^{-6}$ до $6,25 \cdot 10^{-7}$ в діапазоні температур від -10°C до 50°C , що в свою чергу підвищить точність синхронізації приймально-передавальної апаратури систем цифрового телебачення.

Література

1. Benoit Herve. Digital television, 4th edition. Focal Press, 2008. 304 p.
2. Иванов А.А. Синхронизация в системе цифрового телевидения : монография / А.А. Иванов / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – 104 с.
3. Підченко С. К. Теорія і реалізаційні основи інваріантних багаточастотних п'єзорезонансних пристроїв та систем : монографія / С. К. Підченко. – Хмельницький : ХНУ, 2014. – 400 с.
4. Khotpinskiy R. P. Dynamics of temperature-frequency processes in multifrequency crystal oscillators with digital compensations of resonator performance instability / R.P. Khotpinskiy, A. A. Taranchuk, S. K. Pidchenko // Radioelectronics and Communications Systems (English translation Izvestiya VUZ. Radioelektronika) – USA: Allerton Press Inc, June 2015 – Vol. 58, No 6. – P. 250-257. – ISSN 0735-2727.
5. Хоптинський Р.П. Квадратурний демодулятор OFDM систем з цифровою компенсацією температурної нестабільності генератора опорних сигналів / Р. П. Хоптинський, А. А. Таранчук, С. К. Підченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 2 – С. 80–85.
6. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Риле Ф. ; пер. с англ. – М. : Физматлит, 2009. – 512 с.
7. Introduction to Quartz Frequency Standards – Quartz and the Quartz Crystal Unit. Oscilent.com. Retrieved on 2010-02-08.
8. Вороховський Я. Базовые перспективные модели прецизионных кварцевых генераторов для телекоммуникационных и навигационных систем / Я. Вороховський // Электронные компоненты. – 2003. – № 5. – С. 57–61.
9. Белов Л. Опорные генераторы / Л. Белов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – № 6. – С. 38–44.
10. Патент на корисну модель № 103493 (Україна). Синтезатор частоти / Таранчук А.А., Підченко С.К., Хоптинський Р.П. Заявник і власник Хмельницький національний університет. – Опубліковано 25.12.2015, бюл. № 24/2015.
11. Таранчук А.А. Аналіз методів поліпшення температурних характеристик прецизійних кварцових генераторів / А.А. Таранчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2000. – № 3. – С. 196–199.
12. Matlab/Simulink. User's Guide. – COPYRIGHT 1990–2015 by The MathWorks, Inc.
13. Поликаровских А.И. Прямые цифровые синтезаторы частоты с комбинированным методом формирования исходного гармоничного сигнала / А.И. Поликаровских // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 1 – С. 178–185.

References

1. Benoit Herve. Digital television, 4th edition. – Focal Press, 2008. – 304 p.
2. Ivanov A.A. Sinhronizatsiya v sisteme tsifrovogo televideniya, MGTU im. N.E. Baumana: monografiya / A.A. Ivanov, 2010. – 104 s.
3. Pidchenko S. K. Teoriia i realizatsiini osnovy invariantnykh bahatochastotnykh piezorezonansnykh prystroiv ta system : monohrafiia / S. K. Pidchenko. – Khmelnytskyi, KhNU, 2014. – 400 s.
4. R. P. Khoptynskiy. Dynamics of temperature-frequency processes in multifrequency crystal oscillators with digital compensations of resonator performance instability / R.P. Khoptynskiy, A. A. Taranchuk, S. K. Pidchenko // Radioelectronics and Communications Systems (English translation Izvestiya VUZ. Radioelektronika) – USA: Allerton Press Inc, June 2015 – Vol. 58, No 6. – Pp. 250-257. – ISSN 0735-2727.
5. Khoptynskiy R. P. Kvadrurnyi demodulator OFDM system z tsyfrovou kompensatsiieiu temperaturnoi nestabilnosti heneratora opornykh syhnaliv / R. P. Khoptynskiy, A. A. Taranchuk, S. K. Pidchenko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. VOTTP, 2014. – № 2 – S. 80-85.
6. Rile F. Standartyi chastoty. Printsipy i prilozeniya / Per. s angl. — M: Fizmatlit, 2009. - 512 s.
7. Introduction to Quartz Frequency Standards – Quartz and the Quartz Crystal Unit. Oscilent.com. Retrieved on 2010-02-08.
8. Vorohovskiy YA. Bazovyye perspektivnyie modeli pretsizionnyih kvartsevyyih generatorov dlya telekommunikatsionnyih i navigatsionnyih sistem // Elektronnyie komponenty. – 2003. – № 5. – S. 57- 61.
9. Belov L. Opornyie generatoryi // Elektronika: Nauka, Tehnologiya, Biznes, 2004. – № 6. – S. 38–44.
10. Patent na korysnu model № 103493 (Ukraina). Syntezator chastoty. Taranchuk A.A., Pydchenko S.K., Khoptynskiy R.P., Opublikovano 25.12.2015, biul. № 24/2015. Zaiavnyk i vlasnyk KhNU.
11. Taranchuk A.A. Analiz metodiv polipshennia temperaturnykh kharakte-rystyk pretsyziinykh kvartsovykh henerativ // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – Khmelnytskyi, 2000. – № 3. – S. 196–199.
12. Matlab/Simulink. Users Guide. – COPYRIGHT 1990–2015 by The MathWorks, Inc.
13. Polikarovskih A.I. Pryamyie tsyfrovyye sintezatoryi chastoty s kombinirovannyim metodom formirovaniya ishodnogo garmonichnogo signala / Herald of Khmelnytskyi National University. – 2014 . – № 1 – S. 178-185.

Рецензія/Peer review : 14.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О.І.

УДК 621.01

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, А.П. ЛИПИН, С.А. РОМАШКЕВИЧ
Одесская национальная академия пищевых технологийКИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЯТИЗВЕННОГО
ЗУБЧАТО-РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА

Решена задача кинематического анализа пятизвенового зубчато-рычажного механизма, входным звеном которого является цилиндрическое зубчатое колесо, установленное соосно с одним из рычагов базового шарнирного четырехзвенника. Математическое моделирование поставленной задачи осуществлено с применением элементов векторной алгебры и понятия «обращенный механизм», что позволило получить функцию положения механизма относительно рычага, соосного с зубчатым колесом, в виде алгебраического уравнения четвертого порядка. Установлено, что из четырех возможных корней уравнения, действительными могут быть только два, соответствующие двум сборкам базового шарнирного четырехзвенника. Приведен числовой пример.

Ключевые слова: кинематический анализ, входное звено, зубчатое колесо, моделирование, алгебраическое уравнение, корень уравнения, базовый шарнирный четырехзвенник.

R. V. AMBARTSUMYANTS, A. P. LIPIN, S. A. ROMASHKEVICH
Odessa National Academy of Food Technologies

KINEMATIC RESEARCH OF THE GEARED FIVE-BAR LINKAGES MECHANISM

Among geared linkages mechanisms a five-bar geared linkages mechanism is the most widespread in the technique, as well as its varieties. It happens because of a small number of its links. The analysis of the modern condition of the question of the kinematic analysis of the five-bar geared linkages mechanism has been carried out and urgency of the task, stated in the work, has been substantiated. In the research of this mechanism, which was made before, the links of the base jointed four-linked mechanism were used as an entrance link. In the given work the spur gear wheel, mounted on the basis of the mechanism coaxially with one of the levers of the base jointed four-linked mechanism, was taken as an entrance link. It allows to reveal new functional abilities of the mechanism. The solution of the task of the kinematic analysis has been carried out by application of the elements of vectorial algebra and abstract notion of "a transformed mechanism". The function of the condition of the exit link of the base jointed four-linked mechanism coaxial with the entrance spur gear wheel, has been received as an algebraic equation of the fourth order. The analysis of this function has shown that from the four possible roots of the equation only two roots can be real, which correspond to two assemblies of the base jointed four-linked mechanism. It has also been determined, that the exit link of the jointed four-linked mechanism, coaxially with the entrance gear wheel, must be a crank. The simple expressions, determining the kinematic indices (condition, analogues of the speeds and accelerations) of the other exit link of the base jointed four-linked mechanism have been received. The numerical example has been given.

Keywords: kinematic analysis, entrance link, spur gear wheel, modelling, algebraic equation, root of equation, base articulated mechanism.

Пятизвенные зубчато-рычажные механизмы (ЗРМ) с одной степенью подвижности, синтезированные на базе шарнирного четырехзвенного рычажного механизма путем внесения пары сопряженных зубчатых колес, нашли сравнительно большее применение в различных отраслях техники благодаря более широким функциональным возможностям в сравнении с базовыми четырехзвенными рычажными механизмами различных модификаций [1, 3, 5, 6]. В этой связи в технической литературе исследованию кинематики вышеуказанных ЗРМ посвящено много работ. Однако, в работах по кинематическому исследованию пятизвенового ЗРМ определенной структуры (рис. 1), в качестве входного звена выбрано одно из рычажных звеньев базового шарнирно-рычажного четырехзвенника, образующего кинематическую пару со стойкой – звено 1, либо 3, что, естественно, сравнительно облегчает математическое моделирование поставленной задачи кинематического анализа и ее реализацию.

На наш взгляд, особый интерес представляет исследование кинематики представленного механизма, входным звеном которого является зубчатое колесо 4. В этом случае ведомыми звеньями могут быть как звено 1, так и звено 3.

Целью работы является исследование кинематики представленного пятизвенового ЗРМ, входным

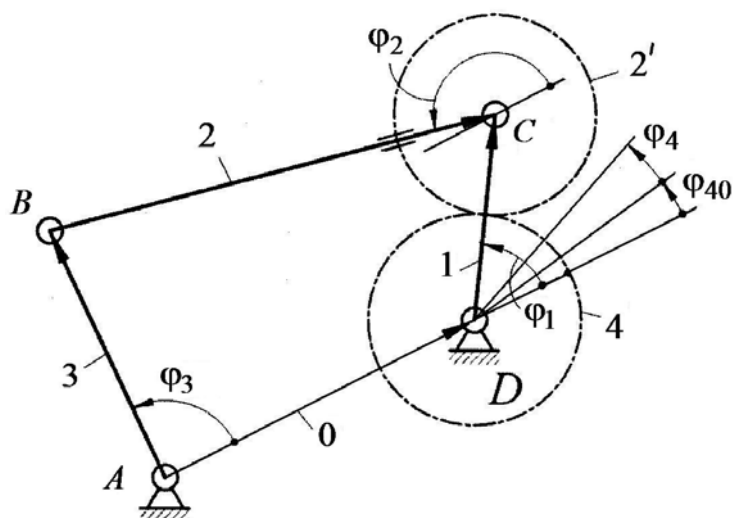


Рис. 1. Пятизвеновый зубчато-рычажный механизм

звеном которого выступает зубчатое колесо 4, а выходным – рычаги 1, 3. Следовательно, закон движения звена 4 задан в виде $\varphi_4 = \varphi_4(t)$, где φ_4 – угол поворота звена 4 относительно стойки механизма; известен угол φ_{40} – начальный угол поворота данного звена, а также линейные размеры l_i ($i = 0,1,2,3$) рычажных звеньев.

Обозначим через φ_j ($j = 1,2,3$) углы поворота подвижных звеньев базового шарнирного четырехзвенника.

Для определения функции положения $\varphi_1 = \varphi_1(\varphi_4)$ рассмотрим векторный контур $ABCD$ (рис. 1).

Запишем

$$\overline{l_3} + \overline{l_2} = \overline{l_0} + \overline{l_1} \text{ или } \overline{l_0} + \overline{l_1} - \overline{l_2} = \overline{l_3}. \tag{1}$$

Для перехода к скалярной форме запишем уравнение (1) возводим в квадрат

$$l_0^2 + l_1^2 + l_2^2 + 2l_0l_1 \cos \varphi_1 - 2l_0l_2 \cos \varphi_2 - 2l_1l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = l_3^2, \tag{2}$$

или
$$l_0^2 + l_1^2 + l_2^2 - l_3^2 + 2l_0l_1 \cos \varphi_1 - 2l_0l_2 \cos \varphi_2 - 2l_1l_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = 0. \tag{3}$$

Для удобства дальнейших преобразований введем обозначения: $a_0 = l_0^2 + l_1^2 + l_2^2 - l_3^2$, $a_1 = 2l_0l_1$,

$a_2 = 2l_0l_2$, $a_3 = 2l_1l_2$, тогда выражение (3) примет вид

$$a_1 \cos \varphi_1 - a_2 \cos \varphi_2 - a_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + a_0 = 0. \tag{4}$$

Преобразуя выражение (4) получим следующий многочлен

$$a_1 \cos \varphi_1 - a_2 \cos \varphi_2 - a_3 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - a_3 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + a_0 = 0$$

и далее

$$\cos \varphi_1 (a_1 - a_3 \cos \varphi_2) - a_2 \cos \varphi_2 - a_3 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + a_0 = 0. \tag{5}$$

Для нахождения угла φ_2 мысленно отсоединим звено 3 от звена 2 и рассмотрим вновь образованный механизм (рис. 2). Данный механизм является дифференциальным, и он обладает двумя степенями свободы.

Используя, применительно к данному механизму, метод обращения движения, запишем [2]

$$i_{42}^{(1)} = \frac{\omega_4 - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} = \pm \frac{z_2'}{z_4}, \tag{6}$$

где знак «+» соответствует внутреннему зацеплению колес $z_4 - z_2'$, знак «-» – внешнему зацеплению.

Преобразуем выражение (6) к более удобному виду

$$\omega_4 - \omega_1 = (\omega_2 - \omega_1) \cdot i_{42}^{(1)} \text{ или } \omega_4 = \omega_2 \cdot i_{42}^{(1)} - \omega_1 \cdot i_{42}^{(1)} + \omega_1 = \omega_2 \cdot i_{42}^{(1)} + \omega_1 \cdot (1 - i_{42}^{(1)}). \tag{7}$$

Делим левую и правую часть уравнения (7) на ω_1 , имеем

$$\frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} i_{42}^{(1)} + 1 - i_{42}^{(1)} \text{ или } \varphi_4' = \varphi_2' i_{42}^{(1)} + 1 - i_{42}^{(1)}, \tag{8}$$

где φ_4' , φ_2' – аналоги угловых скоростей звеньев 4 и 2 соответственно.

Запишем уравнение (8) в дифференциальной форме

$$\frac{d\varphi_4}{d\varphi_1} = i_{42}^{(1)} \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} + 1 - i_{42}^{(1)} \text{ или } d\varphi_4 = i_{42}^{(1)} d\varphi_2 + d\varphi_1 - i_{42}^{(1)} d\varphi_1. \tag{9}$$

После интегрирования уравнения (9), ввиду того, что $i_{42}^{(1)} = const$, получим

$$\varphi_4 = i_{42}^{(1)} \varphi_2 + (1 - i_{42}^{(1)}) \varphi_1, \tag{10}$$

Из (10) для угла φ_2 получим выражение

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_4 - (1 - i_{42}^{(1)}) \varphi_1}{i_{42}^{(1)}} = i_{24}^{(1)} \varphi_4 - (i_{24}^{(1)} - 1) \varphi_1, \tag{11}$$

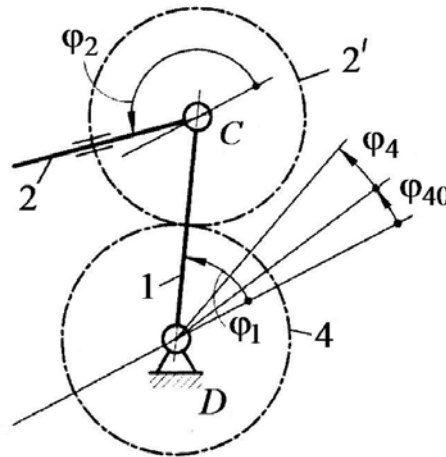


Рис. 2. Дифференциальный зубчато-рычажный механизм

Выражение (5) с учетом (11) приобретает вид

$$a_1 \cos \varphi_1 - A \cos \varphi_1 \cos(\lambda \varphi_1) - B \cos \varphi_1 \sin(\lambda \varphi_1) - C \cos(\lambda \varphi_1) - D \sin(\lambda \varphi_1) - B \sin \varphi_1 \times \\ \times \cos(\lambda \varphi_1) + A \sin \varphi_1 \sin(\lambda \varphi_1) + a_0 = 0,$$

где $\lambda = i_{24}^{(1)} - 1$, $A = a_3 \cos(i_{24}^{(1)} \varphi_4)$, $B = a_3 \sin(i_{24}^{(1)} \varphi_4)$, $C = a_2 \cos(i_{24}^{(1)} \varphi_4)$, $D = a_2 \sin(i_{24}^{(1)} \varphi_4)$.

После преобразования данного выражения получим

$$a_1 \cos \varphi_1 - A \cos(i_{24}^{(1)} \varphi_1) - B \sin(i_{24}^{(1)} \varphi_1) - C \cos((i_{24}^{(1)} - 1) \varphi_1) - D \sin((i_{24}^{(1)} - 1) \varphi_1) + a_0 = 0. \quad (12)$$

Очевидно, уравнение (12) решаемо для каждого значения передаточного отношения $i_{24}^{(1)}$, за исключением $i_{24}^{(1)} = 1$. Для дальнейшего решения задачи примем $i_{24}^{(1)} = -1$. Тогда на основании (12) находим

$$K \cos \varphi_1 + B \sin \varphi_1 - C \cos(2\varphi_1) + D \sin(2\varphi_1) + a_0 = 0, \quad (13)$$

где $K = a_1 - A$.

Применив известные в тригонометрии формулы к нашему случаю, выражение (13) представим в виде

$$K \cos \varphi_1 + B \sin \varphi_1 - 2C \cos^2 \varphi_1 + 2D \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 + F = 0. \quad (14)$$

где $F = C + a_0$.

Далее, для решения уравнения (14) перейдем к одноименной тригонометрической функции, например к тангенсу. Используя формулы двойного аргумента получим

$$K \frac{1 - \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2)} + B \frac{2 \operatorname{tg}(\varphi_1/2)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2)} - 2C \frac{(1 - \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2))^2}{(1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2))^2} + 2D \frac{1 - \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2)} \cdot \frac{2 \operatorname{tg}(\varphi_1/2)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_1/2)} + F = 0.$$

Вводя обозначения $x = \operatorname{tg}(\varphi_1/2)$ и проводя преобразования, находим

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0, \quad (15)$$

где $a = -K - 2C + F$, $b = 2B - 4D$, $c = 4C + 2F$, $d = 2B + 4D$, $e = K - 2C + F$.

Таким образом, относительно неизвестного угла φ_1 имеем алгебраическое уравнение четвертого порядка. Естественно, из четырех полученных значений корней решения данного уравнения, действительными будут только два, соответствующие двум сборкам базового шарнирно-рычажного четырехзвенника.

Точное решение уравнения (15) произвести довольно сложно, поэтому рекомендуем осуществлять его численными методами [4].

Коэффициенты уравнения (15) a , b , c , d , e являются функциями от угла φ_4 поворота входного звена. Следовательно, из решения уравнения (15) в табличной форме находим функциональную зависимость $\varphi_1 = \varphi_1(\varphi_4)$, что позволит методом численного дифференцирования определить аналоги угловой скорости и ускорения звена 1. После этого, определить кинематические параметры звена 3 не представляет труда.

Из рис. 1 следует

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} \frac{l_1 \sin \varphi_1 - l_2 \sin \varphi_2}{l_0 + l_2 \cos \varphi_2 - l_1 \cos \varphi_1}. \quad (16)$$

Функция $\varphi_1 = \varphi_1(\varphi_4)$ определена. Тогда из выражения (11) находим функцию $\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_4)$, что позволяет найти первую и вторую производные функции (16).

Пример. Определить функцию положения $\varphi_1 = \varphi_1(\varphi_4)$ пятизвенного зубчато-рычажного механизма с параметрами: $l_0 = 0,1$ м, $l_1 = 0,048$ м, $l_2 = 0,09$ м, $l_3 = 0,08$ м, передаточное отношение $i_{12} = -1$.

Решение уравнение (15) осуществлено с использованием интернет-ресурса <http://erichware.info/sposob/matemat/urav234.htm>. График функции положения звена 1 и его аналога угловой скорости представлен на рис. 3, откуда следует, что выходное звено совершает полный оборот с переменной угловой скоростью. Звено 3 базового шарнирного четырехзвенника совершает качательное движение с углом размаха $(\varphi_3)_{\max} = 1,344$ радиан.

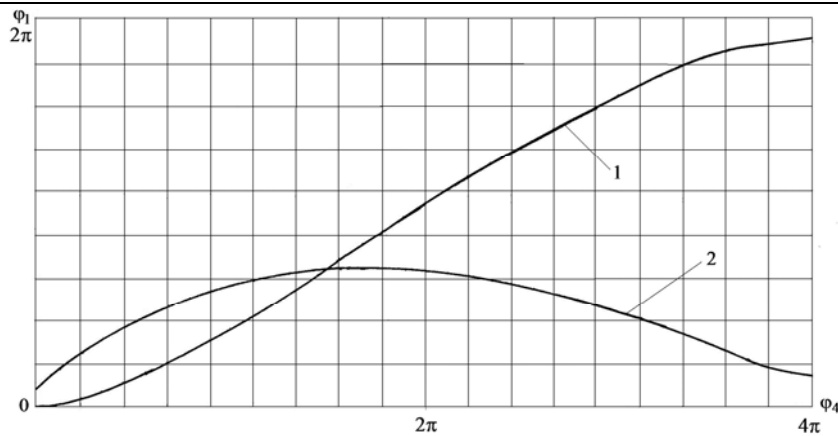


Рис. 3. График функции положения звена 1 (кривая 1) и его аналог угловой скорости (кривая 2)

Выводы:

1. Функция положения выходного кривошипа в зависимости от угла поворота входного зубчатого колеса нелинейная и ее невозможно выразить в явном виде.
2. Лишь в табличной форме можно получить информацию о его положениях после решения алгебраического уравнения четвертого порядка.
3. Для обеспечения полной проворачиваемости входного зубчатого колеса должно соблюдаться неравенство $l_1 < l_3 < l_0 < l_2$, т.е. базовый шарнирный четырехзвенник должен быть однокривошипным или двухкривошипным, причем кривошип и входное зубчатое колесо должны быть соосными.
4. Анализ кинематики рассматриваемого механизма позволяет установить, что ведомый кривошип вращается неравномерно и максимальный его угол поворота за полный оборот входного звена определяется выражением $(\varphi_1)_{\max} = 0,5(1 - i_{12})$.

Литература

1. Амбарцумянц Р.В. К синтезу пятизвенного зубчато-рычажного механизма / Амбарцумянц Р.В., Липин А.П. – М. : Изв.вузов. Машиностроение, 1989. – № 7. – С. 56–59.
2. Артоболевский И.И. и др. Синтез плоских механизмов / И.И. Артоболевский, Н.И. Левитский, С.А. Черкудинов. – М. : Физматгиз, 1959. – 1084 с.
3. Демурчян С.Н. Синтез пятизвенного передаточного зубчато-рычажного механизма / Демурчян С.Н. // Изв. АН Арм. ССР. Сер. техн. наук. – 1973. – № 1. – С. 20–24.
4. Калиткин Н.Н. Численные методы / Калиткин Н.Н. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
5. Карелин В.С. Проектирование рычажных и зубчато-рычажных механизмов / Карелин В.С. – М. : Машиностроение, 1988. – 181 с.
6. Шашкин А.С. Зубчато-рычажные механизмы / Шашкин А.С. – М. : Машиностроение, 1971. – 192 с.

References

1. Ambarcumyanc R.V., Lipin A.P. K sintezu pyatizvennogo zubchato-ry'chazhnogo mexanizma // - M.: Izv.vuzov. Mashinostroenie, 1989. - № 7. - P. 56-59.
2. Artobolevskij I.I. i dr. Sintez ploskix mexanizmov // I.I. Artobolevskij, N.I.Levitskij, S.A.Cherkudunov. - M.: Fizmatgis, 1959. - 1084c.
3. Demurchyan S.N. Sintez pyatizvennogo peredatochnogo zubchato-ry'chazhnogo mexanizma // Izv.AN Arm.SSR. Ser.texn.nauk, 1973. - № 1. - P.20-24.
4. Kalitkin N.N. Chislenny'e metody'. - M.: Nauka, 1978. – 512 p.
5. Karelin V.S. Proektirovanie ry'chazhny'x i zubchato-ry'chazhny'x mexanizmov. - M.: Mashinostroenie, 1988. – 181p.
6. Shashkin A.S. Zubchato-ry'chazhny'e mexanizmy'. - M.: Mashinostroenie, 1971. – 192p.

Рецензия/Peer review: 21.06.2018 г. Напечатана/Printed: 21.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гладушняк А.К.

УДК 621.771.23/.237

О.Г. КУРПЕ
ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ», м. Маріуполь
В.В. КУХАР
ДВНЗ «Призовський державний технічний університет»

ОСВОЄННЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ ТОВЩИНОЮ 1,2 ММ НА СТАНІ 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»

В роботі розроблена технологія та підтверджена технічна можливість виробництва надтонких рулонів розмірами 1,2×1000 мм з низьковуглецевих марок сталі в умовах існуючого обладнання стану 1700. Попередньо виконані розрахунки дозволили оцінити технічну можливість використання обладнання стану 1700 та розробити технологію. Вироблена дослідна партія надтонких рулонів розмірами 1,2×1000 мм, що відповідає вимогам EN 10111 до сталі марки DD11 та EN 10051 у допусках по товщині до прокату з низьковуглецевих марок сталей та нормальними відхиленнями по площинності (якщо продукція буде вироблятися у листах), а також іншим аналогам вказаних стандартів. Отримані за результатами прокатки технічні та технологічні параметри є такими, що порівнюються з попереднім розрахунком, та підтверджують можливість подальшого засвоєння та розширення виробництва надтонкого сортаменту рулонів на стані 1700.

Ключові слова: надтонкий рулони, гарячекатані рулони, технологія прокатки, стан 1700, розширення сортаменту

O.H. KURPE
METINVEST HOLDING, LLC, Mariupol, Ukraine
V.V. KUKHAR
Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine

PRODUCTION DEVELOPMENT FOR HOT-ROLLED THIN COILS OF 1,2 MM THICKNESS AT ROLLING MILL 1700, PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS"

In the paper, the technology has been developed and the technical capability has been proved for production of ultra thin coils (1.2×1000 mm in sizes) from low-carbon steel grades utilizing the existing equipment at 1700 mill. The relevance of the production development for hot-rolled coils of 1,2 mm thickness at rolling mill 1700 PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS" is conditioned upon plans for product mix expansion for production of substituted upon export products, including those that correspond to EU standards requirements. Previously products of thickness less than 1,5 mm were produced by cold-rolling technology at domestic enterprises. Preliminary calculations have made it possible to evaluate the technical possibility of 1700 mill equipment utilization and to develop the technology. The pilot batch has been produced within negative allowance range and has lens cross-section, that corresponds to the majority of the requirements of further processors. During the next stages of ultra thin coils product mix implementation, the automatic rolling process may be improved taking into account the accumulated statistical information, and by introduction of changes to the system of the rolling process adjustment within the finishing train. A pilot batch of ultrathin coils (1.2×1000 mm) has been produced, and it meets the requirements of EN 10111 for steel grade DD11 and EN10051 for thickness tolerances of rolled products produced of low-carbon steel grades and normal flatness deviations (if products are to be produced in plates), and it is also in conformity with other standards similar to the abovementioned. The technical and technological parameters obtained after rolling are comparable with the preliminary calculations and confirm the possibility of further development and expansion of ultra thin coils product-mix production at 1700 mill, both as for coils width increase and expanding of steel grades mix with improvement of the strength grade.

Keywords: ultra thin coils, hot-rolled coils, rolling technology, 1700 mill, expansion of the product-mix.

Вступ

Спроби знизити собівартість прокатної продукції кінцевих переробників призвели до появи на ринку великого споживчого сектору надтонкого рулонного гарячекатаного прокату. Класифікація терміну «надтонкий сортамент» може відрізнятися на різних підприємствах. У більшості випадків до такої продукції відносяться гарячекатані рулони товщиною менше ніж 1,5 мм.

Суттєве зниження собівартості кінцевої продукції забезпечується за рахунок заміни переробниками холоднокатаного прокату на гарячекатаний. Таким чином, з ланки формування собівартості та ціни вилучається цілий холоднокатаний переділ. Раніше товщини менші ніж 1,5 мм вироблялися тільки способом холоднокатаної прокатки. Але і досі є кінцева продукція, яка виробляється тільки з холоднокатаного прокату з огляду на деякі його індивідуальні властивості.

Слід зазначити, що більшість станів у світі, які були побудовані з 1970 по 2000 роки, мають можливість виробляти гарячекатані рулони товщиною до 1,2 мм, а деякі стани мають можливість прокатування рулонів товщиною до 0,8 мм [1–6]. В той час як раніше мінімальна товщина гарячекатаних рулонів, яку можна було прокатати, становила 1,5 мм [7].

Таким чином, більшістю металургійних компаній у світі [1, 2] засвоєне виробництво надтонкого рулонного гарячекатаного прокату.

На теперішній час такий сортамент рулонів є розповсюдженим видом продукції. У зв'язку з чим в літературних джерелах майже відсутня інформація по рекомендаціях та технологічних особливостях засвоєння надтонкого сортаменту гарячекатаних рулонів.

Слід зазначити, що в нашій країні рулони товщиною менше ніж 1,5 мм не виробляються [1]. Тому вельми важливим для вітчизняних виробників є заміщення експорту власним виробництвом.

Для засвоєння такої продукції на вітчизняних підприємствах необхідно виконати оцінку технічних можливостей існуючого обладнання та провести ряд технологічних експериментів.

Актуальність розробки технології виробництва гарячекатаних рулонів товщиною до 1,2 мм на стані 1700 ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА» обумовлена планами по розширенню сортаменту виробництва експортно заміної продукції, у тому числі у відповідності до вимог стандартів ЄС.

Мета

Метою роботи є оцінка технічної можливості, розробка технології та засвоєння виробництва гарячекатаних рулонів товщиною 1,2 мм на стані 1700 ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Основна частина

Існуюче обладнання стану 1700 на даний час складається з чотирьох методичних печей, три з яких штовхального типу були модернізовані з метою нагріву слябів розмірами до 250×1550×6200 мм. Одна пічка виробництва фірми «Stein Heurtey», Франція, крокуючого типу з можливістю нагріву слябів розмірами до 250×1600×10500 мм. Сляб товщиною 250 мм застосовується тільки в разі редукування на Слябінгу. Чорнова група клітей включає одну кліть «дуо» № 01 (чорновий окалиноломатель) та 5 клітей «кварто» (1–4 та 4а), чотири з яких є універсальними (2–4 та 4а). Також встановлені теплозберігаючі екрани, летючі ножиці. Чистова група складається з 6-х клітей «кварто» (5–10), установки прискореного охолодження, яка в свою чергу складається з 14 секцій та 3-х моталок, дві з яких можуть змотувати рулони вагою до 9 т, а одна, остання по ходу прокатки, може змотувати рулони вагою до 26 т. Слід зазначити, що на стані встановлено 7 гідрозбівів окалини з тиском в межах 80–140 атм.

Схема розміщення основного обладнання стану 1700 наведена на рис. 1.

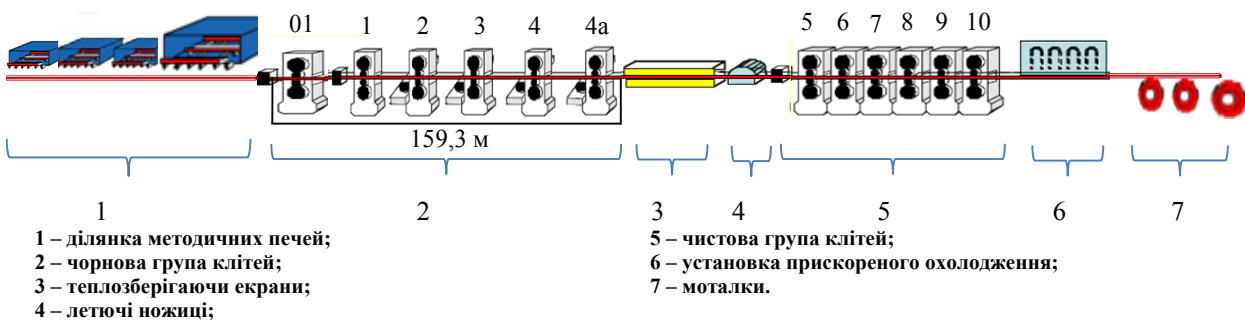


Рис. 1. Існуюча схема розміщення основного обладнання стану 1700

Згідно з проектом та діючою технологією прокатний стан виробляє гарячекатані рулони вагою до 9 т, товщиною від 1,5 до 9 мм, шириною від 1000 до 1530 мм, залежно від сортаменту, з марок від 08пс (відповідно до ГОСТ 1050) до 09Г2С (відповідно до ГОСТ 19281), S355 усіх категорій відповідно до EN 10025-2 та інший аналогічний сортамент, обмежений тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа.

За для експерименту по засвоєнню надтонкого сортаменту рулонів був обраний наступний сортамент: розміри 1,2×1000 мм, марка сталі 08пс згідно з ГОСТ 1050 (або її аналог DD11 згідно з EN 10111), який не є проектним, але має високий ринковий попит. В якості заготовки використовувався безперервно литий сляб розмірами 150×1000×6150 мм.

Після декількох ітерацій попереднього розрахунку, за умов забезпечення роботи діючого обладнання в межах проектних навантажень, запропоновано наступний температурно-деформаційний режим прокатки, табл. 1.

Таблиця 1

Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів розмірами 1,2×1000 мм на стані 1700

№ кліті	Показчики				
	Товщина*, мм	Температура °С	Сила прокатки, МНх100	Максимально допустима сила прокатки, МНх100	Швидкість прокатки, м/с
0**	150				
01	128	1260	469,4	800	0,85
1	95	1240	771,9	2500	1,26
2	58	1219	998,0	2500	1,63
3	40	1183	736,2	2000	1,78
4	30	1134	627,2	2000	1,78
4а	23	1063	702,9	2000	2,89
5	12	1000	1177,5	2400	1,39
6	5,6	985	1238,5	2400	2,79
7	3,3	963	923,2	2000	4,24
8	2	932	860,3	1800	6,36
9	1,4	888	766,3	1700	8,84
10	1,2	814	432,3	1500	11,31

* товщина після проходу

** початкові дані

Розрахунок виконано при збереженні наступних діючих технологічних умов [8, 9]:

- товщина підкату для чистової групи повинна бути не більш ніж 23 мм з метою утримання температури розкату, а також забезпечення умов обтиску для отримання кінцевої товщини рулонів;
- температура прокатки в кліті 4а не повинна бути нижчою за 1040 °С.

Виконаний розрахунок показує можливість прокатування гарячекатаних рулонів розмірами 1,2×1000 мм зі сталі марки 08пс або її аналогів на стані 1700 без перевищення технічних характеристик обладнання. Також згідно з розрахованим та максимально допустимим рівнем сили прокатки є резерв, завдяки якому можливе подальше розрахування та засвоєння виробництва надтонкого сортаменту гарячекатаних рулонів з більш міцних марок сталі та/або більшої ширини.

З метою підтвердження технічної можливості виробництва згідно розрахунків, наведених в табл. 1, була прокатана дослідна партія рулонів. За результатами прокатки отримані наступні технологічні параметри, табл. 2.

Таблиця 2

Технологічні параметри отримані за результатами прокатки

Показник	Значення
Товщина підкату, мм	23
Температура за кліттю 4а, °С	1082-1075
Температура за кліттю 10, °С	800-770

Отримані значення за результатами прокатки є порівняними та підтверджують достовірність виконаних попередніх розрахунків та обмежень.

Оцінка якості отриманих рулонів виконувалась на підставі порівняння механічних властивостей та геометричних параметрів прокату.

Результати оцінки механічних властивостей та порівняння з вимогами різних стандартів наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Механічні властивості опитної партії рулонів розмірами 1,2x1000 мм

Плавка / вимоги	Марка сталі / категорія	Механічні властивості		
		Межа плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Відносне подовження, %
262753-3	08пс	330	395	25
Вимоги ДСТУ 2834 (ГОСТ 16523)	K270B	-	270-410	24
Вимоги EN 10111	DD11	170-360	≤440	22

Таким чином, вироблена партія рулонів за механічними властивостями відповідає вимогам групи міцності K270B згідно з ДСТУ 2834 (ГОСТ 16523) та марки сталі DD11 згідно з EN 10111.

Для оцінки отриманих геометричних розмірів по довжині та ширині смуги один рулон був порізаний на листи розмірами 1,2×1000×2000 мм. Вимір товщини та площинності виконували на кожному десятому листі. Всього з одного рулону порізано 340 листів. Результати вимірів наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Результати вимірів смуги по товщині та ширині

Показник	Виміри товщини по точках, мм					Площинність, мм
	25	40	Середина	-40	-25	
Мінімальне значення	1,02	1,08	1,10	1,02	1,03	3
Максимальне значення	1,18	1,19	1,22	1,20	1,16	14
Середнє значення	1,08	1,12	1,16	1,13	1,09	8,7
Вимоги ГОСТ 19903			1,2+/-0,13(для нормальної точності)			15 (для покращеної площинності в листах)
Вимоги EN 10051			1,2+/-0,13			18 (нормальні відхилення в листах)

Вироблені рулони відповідають вимогам ГОСТ 19903 до прокату нормальної точності по товщині та покращеної площинності (якщо продукція буде вироблятися у листах), а також вимогам EN 10051 по товщині до прокату з низьковуглецевих марок сталей та нормальними відхиленнями по площинності (якщо

продукція буде вироблятися у листах).

Переріз прокатоної смуги, який побудовано на даних по середніх вимірах, наведений на рис. 2.

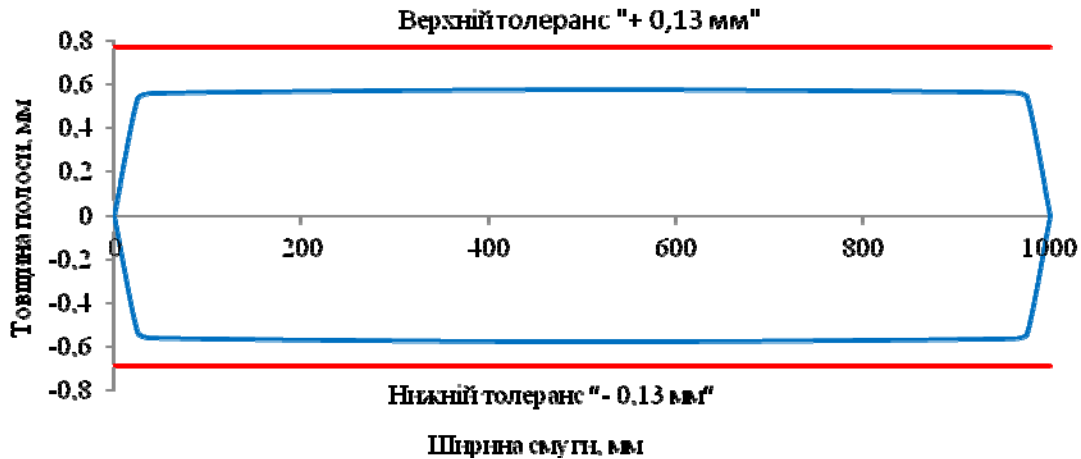


Рис. 2. Переріз прокатоної смуги

Згідно з рис. 2 прокатана смуга має переріз у формі «сочевиці» [10–12], що відповідає більшості вимог подальших переробників продукції. Середня товщина зміщена до мінусового допуску. Динаміка змінення середньої товщини по довжині смуги наведена на рис. 3.

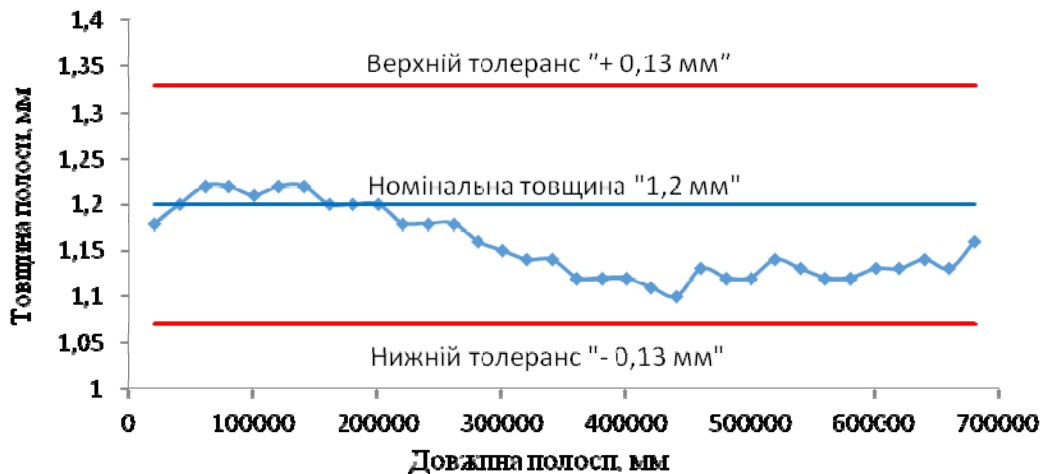


Рис. 3. Графік змінення середньої товщини по довжині смуги

На рис. 3 змінення товщини смуги з номіналу від початку прокатки та її наближення до мінусового допуску 1,12-1,11 мм майже з середини смуги і до кінця прокатки пов'язане з відпрацюванням системи автоматизації стану та накопичуванням статистичної інформації, яку система отримує в процесі прокатки нового сортаменту. При подальших етапах засвоєння надтонкого сортаменту рулонів автоматичний процес прокатки може бути скорегований внесенням змін до системи регулювання прокаткою в чистовій групі клітей [13, 14].

Висновки

1. Підтверджена технічна можливість виробництва надтонких рулонів розмірами 1,2×1000 мм з низьковуглецевих марок сталі в умовах існуючого обладнання стану 1700.

2. Виконано розрахунок та запропоновані режими прокатки рулонів розмірами 1,2×1000 мм зі сталі марки 08пс згідно з ГОСТ 1050 та її аналогів.

3. Вироблена дослідна партія рулонів розмірами 1,2×1000 мм, що відповідає вимогам EN 10111 до сталі марки DD11 та вимогам EN 10051 до товщини прокату з низьковуглецевих марок сталей та нормальним відхиленням по площинності (якщо продукція буде вироблятися у листах), а також вимогам ДСТУ 2834 (ГОСТ 16523) до групи міцності K270В та ГОСТ 19903 до покату нормальної точності по товщині та покращеної площинності (якщо продукція буде вироблятися у листах), а також іншим аналогам вказаних стандартів.

4. Отримані за результатами прокатки технологічні параметри є такими, що порівнюються з розрахунком, та підтверджують технічну можливість подальшого засвоєння та розширення виробництва надтонкого сортаменту рулонів на стані 1700.

Література

1. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Производство горячекатаных листов и полос : справочное издание в 2-х книгах / Ю.В. Коновалов. – М. : «Теплотехник», Книга 1, 2008. – 640 с.
2. John G. Lenard. Primer on Flat Rolling. / John G. Lenard // *Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process*: Elsevier Ltd, Chapter 3. – 201. – p. 36-98. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>
3. Okamoto K. Process Control System of Ultra Thin Strip Production Line at Tangshan Iron and Steel Group Co. in China / K. Okamoto, Y. Wakamiya, N. Shimoda, T.Itoh, Wan Hailong, Liu Wenzhong // *IFAC New Technologies for Automation of Metallurgical Industry*. Shanghai, P.R. China. – 2003. – p. 263–268, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37640-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37640-1)
4. Quan-Ke Pan. A mathematic model and two-stage heuristic for hot rolling scheduling in compact strip production / Quan-Ke Pan, Qing-da Chen, Tao Meng, BingWang, Liang Gao // Elsevier, Volume 48. – 2017. – p. 516–533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.03.067>
5. Hiroshi Hirano. Width necking at the rougher in a hot-strip mill / Hiroshi Hirano, Haruhiro Ibata, Hiroshi Kawatani, Ichiro Kokubo // *Journal of Mechanical Working Technology*. Elsevier Scientific Publishing Company. – 1983. – №7. – p. 367–383. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(83\)90066-9](https://doi.org/10.1016/0378-3804(83)90066-9)
6. W.Y.D.Yuen. The modelling of the mechanics of deformation in flat rolling / W.Y.D.Yuen, A. Dixon, D.N. Nguyen // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1996. – p. 87-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02312-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02312-6)
7. F.Belgrano. A Mathematical Model to Control a Six Stand Hot Strip Finishing Mill / F.Belgrano, G.Chighizola, F.Delfino, V.Giori, V.Neglia // *IFAC Proceedings Volumes*. – 1980. – p. 283-290. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64581-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64581-6)
8. Максименко О. П. Теоретический анализ момента при прокатке с натяжением полосы / О. П. Максименко, А. Г. Присяжный, В. В. Кухарь, Е. В. Кузьмин // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск. – 2017. – № 1 (44). – С. 199–203.*
9. Кухарь В. В. Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки / В. В. Кухарь, А. Г. Курпе // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск. – 2018. – № 1 (46). – С. 159–166.*
10. QI Xiang-dong. Optimization of Pass Schedule in Hot Strip Rolling / QI Xiang-dong, WANG Tao, XIAO Hong // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2012. 19(8). – P. 25–28. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60135-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60135-6)
11. N.Kitao. On-Line Quality Control System in Hot Strip Mill / N.Kitao, A.Urano // *IFAC Proceedings Volumes*. – 1984. – p. 1911-1916. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61255-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61255-2)
12. Takao Kawanami. Development of high-precision shape and crown control technology for strip rolling / Takao Kawanami, Takashi Asamura, Hiromi Matsumoto // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1990. – p. 257-275. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(90\)90016-N](https://doi.org/10.1016/0924-0136(90)90016-N)
13. Yoshiharu Anbe. Tension control of a hot strip mill finisher / Yoshiharu Anbe, Kunio Sekiguchi, Hiroyuki Imanari // *13th Triennial World Congress, San Francisco, USA IFAC Proceedings Volumes*. – 1996. – p. 6233–6238. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)58681-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)58681-4)
14. Zhong-feng GUO. Shape Setup System for 1700 Hot Strip Mill / Zhong-feng GUO, Jian-zhong XU, Chang-sheng LI, Xiang-hua LIU // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2007. – p. 27-30. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60069-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60069-7)

Рецензія/Peer review : 26.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.
Прорецензовано редакційною колегією

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА
Рівненський державний гуманітарний університет
О.Ю. ДЕЙНЕКА

Національний університет водного господарства та природокористування

МІЖФАЗНИЙ РОЗРІЗ В ОРТОТРОПНІЙ ПЛАСТИНЦІ З ПІДСИЛЕНИМ КРУГОВИМ КОНТУРОМ

Пропонується наближений розв'язок задачі про часткове підсилення контуру кругового отвору замкненим пружним ребром за наявності міжфазного розрізу, береги якого в процесі деформації не контактують, в нескінченній ортотропній пластинці, що перебуває в умовах однорідного напруженого стану на нескінченності. Моделюючи підсилювальне ребро замкненим криволінійним стрижнем сталого прямокутного поперечного перерізу, математичну модель задачі побудовано у вигляді системи двох сингулярних інтегральних рівнянь з ядрами Гільберта та трьох диференціальних залежностей для визначення контактних зусиль між ребром і пластинкою для визначення внутрішніх зусиль у підсиленні. Для знаходження початкових параметрів в статично невизначеному ребрі використано канонічні рівняння методу сил. Встановлено структуру шуканих функцій на кінцях розрізу. Наближений розв'язок задачі побудовано методом механічних квадратур і колокації, яким досліджено вплив на напружений стан пластинки і підсилення ортотропії матеріалу пластинки та фізико-геометричних параметрів ребра.

Ключові слова: нескінченна ортотропна пластинка, пружне ребро, міжфазний розріз, контактні зусилля, сингулярні інтегральні рівняння.

A.O. SIASKYI, N.V. SHEVTSOVA
Rivne State University of Humanities
O.Y. DEJNEKA

National University of Water Management and Natural Resources, Rivne

INTERFACIAL INCISION IN ORTHOTROPIC PLATES WITH REINFORCED CIRCULAR CONTOUR

An approximate solution of the mixed contact problem about partial amplification of the contour of a circular opening in an infinite orthotropic plate with by a closed resilient rib is proposed in the presence at the boundary of the material section the interfacial incision, the shores of which do not contact during the deformation. A plate with a reinforced opening is in conditions of uniform stressed state at infinity. The dependencies between the deformations of the contour of the plate and the contact forces are given in the form of integral relations with the Hilbert nucleus. The reinforcing rib is modelled by a closed circular ring of a stable rectangular cross-section. Its stress-strain state is described by the basic equations of the one-dimensional theory of curvilinear rod of large curvature, which are constructed using the hypothesis of plane cross sections. Applying the boundary conditions of the problem in the form of the equality of deformations on the site of the junction of the plate and the rib, the mathematical model of the problem is constructed as a system of singular integral-differential equations for determining the contact forces between the plate and the edge, and the internal forces factors in the amplification. The canonical equations of the method of forces are used to establish initial parameters in the conventional section of a statically-indefinite rib. The structure of the sought after functions at the ends of the section is established. The approximate solution of the problem was constructed by the method of mechanical quadratures and collocation, which investigated the effect on the stress state of the plate and the reinforcement the orthotropy of the material of a plate and the physical-geometric parameters of the ribs.

Keywords: infinite orthotropic plate, resilient rib, interfacial incision, contact forces, singular integral equations.

Вступ

Ортотропні пластинки з криволінійними отворами, контури яких підсилені тонкими пружними ребрами сталої чи змінної жорсткості, як елементи тонкостінних конструкцій сучасних машин і споруд, широко використовуються в різних галузях інженерної практики.

Задачі про повне підсилення контурів криволінійних отворів ізотропних (ортотропних) пластинок замкненими пружними ребрами детально опрацьовані в науковій літературі для різних моделей підсилювального ребра [1–3].

У процесі виготовлення чи експлуатації пластинок з підсилювальними ребрами жорсткості в них можуть виникнути міжфазні розрізи нульової ширини i , як потужні концентратори напружень, призвести до руйнування конструкції. За наявності міжфазного розрізу між пластинкою і замкненим пружним ребром задачі про визначення концентрації напружень на межі розділу матеріалів практично не розглядалися. Для ізотропної пластинки з міжфазним розрізом у вигляді дуги кола така задача розглянута в [4].

Найбільш повно вплив міжфазних криволінійних тріщин і розрізів вивчено для масивних кусково-однорідних ізотропних та ортотропних пластин. Огляд літературних джерел по цьому питанню наведено в роботах [5, 6].

Постановка задачі. Розглянемо нескінченну ортотропну пластинку товщиною $2h$ з круговим отвором одиничного радіуса. Контур отвору Γ підсилений замкненим пружним кільцем (ребром) сталого прямокутного поперечного перерізу $2h_0 \times 2\eta$ ($2h_0$, 2η – висота і ширина перерізу).

Спільну серединну площину пластинки і ребра віднесемо до декартової (x, y) і полярної (ρ, λ) систем координат з полюсом в центрі отвору.

Розглянута конструкція перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану, створеного рівномірно розподіленими зусиллями p і q , що діють на нескінченності в напрямках координатних осей і

головних осей ортотропії матеріалу пластинки. Зовнішнє навантаження на підсилювальне ребро відсутнє.

Нехай на симетричній відносно осі Ox ділянці $[\alpha_0; 2\pi - \alpha_0]$ контуру Γ між пластинкою і ребром виник наскрізний міжфазний розріз, береги якого в процесі деформації не контактують.

Мета дослідження – визначення контактних T_p , $S_{p\lambda}$ і кільцевих T зусиль на контурі Γ в пластинці, компонент напруженого стану в підсиленні та дослідження впливу на ці величини виду навантаження, розмірів розрізу, ортотропії матеріалу пластинки та фізико-геометричних параметрів ребра.

Виклад основного матеріалу дослідження

Основні рівняння задачі. Умовно відділивши пластинку від ребра, замінюючи при цьому дію одного тіла на інше невідомими контактними зусиллями T_p , $S_{p\lambda}$, приходимо до першої основної задачі для ортотропної пластинки з круговим отвором і пружного кільця (ребра).

Деформації контуру Γ в пластинці при заданому навантаженні визначаються зі співвідношень [7]

$$\begin{aligned} \varepsilon_\lambda &= \frac{1}{2E_x h} \left[c_1 T_p(\lambda) - \frac{c_2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} S_{p\lambda}(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \frac{c_2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_p(t) dt - \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_p(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \varepsilon_\lambda^0 \right]; \\ V &= \frac{1}{2E_x h} \left[c_1 S_{p\lambda}(\lambda) - \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_p(t) dt + \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} S_{p\lambda}(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \frac{c_4}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_p(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + V^0 \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де введено позначення

$$\begin{aligned} c_1 &= \beta_1 \beta_2 - \nu_x; \quad c_2 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \left[(1 - \beta_1 \beta_2) \cos^2 \lambda - 1 \right]; \quad c_3 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} (1 - \beta_1 \beta_2) \cos \lambda \sin \lambda; \\ c_4 &= \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \left[(1 - \beta_1 \beta_2) \sin^2 \lambda - 1 \right]; \quad V^0 = \frac{p}{2} (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \sin 2\lambda - \frac{q}{2} (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \beta_1 \beta_2 \sin 2\lambda; \\ \varepsilon_\lambda^0 &= \frac{p}{2} [1 + \beta_1 + \beta_2 - \beta_1 \beta_2 - (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \cos 2\lambda] + \frac{q}{2} [\beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2 - 1 + (1 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) \cos 2\lambda] \beta_1 \beta_2; \end{aligned}$$

E_x , ν_x – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластини в напрямку осі Ox ; β_1 , β_2 – корені характеристичного рівняння [7]; ε_λ , V – відносне видовження контуру Γ і кут повороту нормалі до нього внаслідок деформації.

Якщо контактні зусилля стануть відомі, то кільцеві зусилля T_λ на контурі Γ визначаються за формулою, наведеною в [7].

Напружено-деформований стан кільця, викликаний контактними зусиллями, опишемо основними рівняннями одновимірної теорії криволінійних стрижнів великої кривини, для яких поверхня сполучення стрижня з пластинкою не співпадає з його серединною поверхнею [8]:

$$\begin{aligned} &\text{- інтегральні рівняння рівноваги частини кільця } [-\pi; \lambda] \\ N(\lambda) &= -N_0 \cos \lambda + f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda; \quad Q(\lambda) = -N_0 \sin \lambda + f_1(\lambda) \sin \lambda - f_2(\lambda) \cos \lambda; \\ L_b(\lambda) &= L_b^0 + (1 - \eta)(1 + \cos \lambda) N_0 - (1 - \eta)(f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda) + \psi(\lambda), \end{aligned} \quad (2)$$

- фізичні залежності Кірхгофа для крайнього поздовжнього волокна кільця, яке співпадає з контуром Γ

$$\varepsilon_\lambda^{(c)} = \frac{1}{E_0 F_0} \left(N + \frac{\rho - r_0}{\rho} \frac{R L_b}{\omega_0} \right); \quad \frac{d\theta_b}{d\lambda} = \frac{1}{E_0 F_0} \left(N + \frac{R L_b}{\omega_0} \right). \quad (3)$$

У співвідношеннях (2), (3) введено позначення: N , Q , L_b – поздовжня і поперечна сили та згинальний момент, що діють в перерізах кільця і віднесені до його осі; N_0 , L_b^0 – початкові параметри в умовному розрізі $\lambda = -\pi$; $\rho = 1$, $R = 1 - \eta$, r_0 – радіуси кривини контуру Γ , осевого та нейтрального для чистого згину волокон кільця; $\varepsilon_\lambda^{(c)}$, θ_b – відносне видовження зовнішнього крайнього волокна та кут повороту

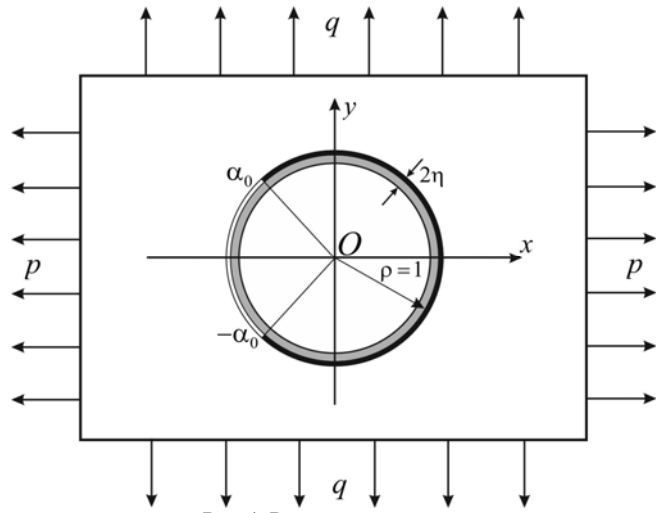


Рис. 1. Розрахункова схема

нормалі до нього; $E_0 F_0$, $E_0 J_0$ – жорсткості кільця на розтяг (стиск) і згин; $\omega_0 = \frac{J_0}{F_0}$;

$$\psi(\lambda) = -\rho \int_{-\pi}^{\lambda} S_{\rho\lambda}(t) dt; \quad f_1(\lambda) + if_2(\lambda) = i \int_{-\pi}^{\lambda} [T_{\rho}(t) + iS_{\rho\lambda}(t)] e^{it} dt. \quad (4)$$

Крайові умови задачі на ділянці сполучення пластинки і кільця формулюємо у вигляді рівності деформацій їх спільних поздовжніх волокон. За відсутності контакту між берегами розрізу ці умови мають вигляд

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}^{(c)}; \quad V = \theta_b, \quad \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0]; \quad T_{\rho} = S_{\rho\lambda} = 0, \quad \lambda \in [\alpha_0; 2\pi - \alpha_0]. \quad (5)$$

Підставляючи (1), (3) в умови (5) з урахуванням (2), одержимо після певних перетворень

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2E_x h} \left[c_1 T_{\rho}(\lambda) - \frac{c_2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} S_{\rho\lambda}(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \frac{c_2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_{\rho}(t) dt - \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_{\rho}(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \varepsilon_{\lambda}^0 \right] = \\ & = \frac{1}{E_0 F_0} \left\{ -N_0 \cos \lambda + f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda + \right. \\ & \left. + \frac{\rho - \eta_0}{\rho} \frac{R}{\omega_0} \left[L_b^0 + (1 - \eta) N_0 - (1 - \eta) (-N_0 \cos \lambda + f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda) + \psi(\lambda) \right] \right\}; \\ & \frac{1}{2E_x h} \left[c_1 S_{\rho\lambda}(\lambda) - \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_{\rho}(t) dt + \frac{c_3}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} S_{\rho\lambda}(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + \frac{c_4}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} T_{\rho}(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + V^0 \right] = \\ & = \frac{1}{E_0 F_0} \int_{-\pi}^{\lambda} \left\{ -N_0 \cos \lambda + f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda + \right. \\ & \left. + \frac{R}{\omega_0} \left[L_b^0 + (1 - \eta) N_0 - (1 - \eta) (-N_0 \cos \lambda + f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda) + \psi(\lambda) \right] \right\} d\lambda; \quad \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0]. \quad (6) \end{aligned}$$

Систему сингулярних інтегральних рівнянь (6) доповнюємо залежностями (4), перетвореними до вигляду

$$T_{\rho}(\lambda) = -f_1'(\lambda) \sin \lambda + f_2'(\lambda) \cos \lambda; \quad S_{\rho\lambda}(\lambda) = -f_1'(\lambda) \cos \lambda - f_2'(\lambda) \sin \lambda; \quad (7)$$

$$\frac{d\psi}{d\lambda} = -S_{\rho\lambda}(\lambda); \quad \lambda \in [-\alpha_0; \alpha_0] \quad (8)$$

та канонічними рівняннями методу сил [8] для визначення сталих N_0 , L_b^0

$$\int_{-\pi}^{\pi} \left[N(\lambda) + \frac{1-\eta}{\omega_0} L_b(\lambda) \right] d\lambda = 0; \quad \int_{-\pi}^{\pi} \left[\left(\frac{(1-\eta)^2}{\omega_0} - 1 \right) \cos \lambda L_b(\lambda) - 2\mu(1+\nu_0) \sin \lambda Q(\lambda) \right] d\lambda = 0. \quad (9)$$

Тут ν_0 – коефіцієнт Пуассона матеріалу кільця, $\mu = 1.2$.

Співвідношення (6)-(9) визначають математичну модель поставленої задачі та слугують для визначення функцій $T_{\rho}(\lambda)$, $S_{\rho\lambda}(\lambda)$, $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$, $\psi(\lambda)$ і початкових параметрів N_0 , L_b^0 . При $\beta_1 = \beta_2 = 1$ вони визначають математичну модель задачі для ізотропної пластинки з круговим отвором [4].

Наближений розв'язок задачі. Точний розв'язок системи (6)-(9) знайти не вдається. Для її наближеного розв'язання необхідно встановити структуру шуканих функцій в околі кінців ділянки сполучення пластинки і кільця.

Оскільки навантаження на кільце зрівноважене, то на підставі позначень (4) для функцій $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$, $\psi(\lambda)$ можна зробити висновок, що

$$f_1(\pm\alpha_0) = f_2(\pm\alpha_0) = \psi(\pm\alpha_0) = 0. \quad (10)$$

Характеристична частина системи (6), яка визначає структуру контактних зусиль $T_{\rho}(\lambda)$, $S_{\rho\lambda}(\lambda)$, має такий же вигляд як і для задачі про часткове підсилення контуру кругового отвору абсолютно жорстким кільцем. Це означає, що на кінцях ділянки сполучення пластинки і пружного ребра контактні зусилля мають кореневу особливість, на яку накладається локальна осциляція. Нехтуючи впливом осциляції, наближений розв'язок задачі можна знайти методом механічних квадратур і колокації. Квадратурні формули цього

методу для сингулярних і регулярних інтегралів та інтегралів зі змінною верхньою межею наведені в роботах [7, 9].

Результати числового розрахунку зусиль T_ρ , $S_{\rho\lambda}$, T_λ на контурі Γ в пластинці та величин $\sigma_*^{(1)}$, $\sigma_*^{(2)}$, τ_* в кільці, визначених за формулами [8]

$$\sigma_*^{(1)} = \frac{1}{F_0} \left(N + \frac{\rho - r_0}{\rho} \frac{RL_b}{\omega_0} \right) \text{ при } \rho = 1; \quad \sigma_*^{(2)} = \frac{1}{F_0} \left(N + \frac{\rho - r_0}{\rho} \frac{RL_b}{\omega_0} \right) \text{ при } \rho = 1 - 2\eta;$$

$$\tau_* = \frac{3Q}{2F_0} \text{ при } \rho = 1 - \eta, \tag{11}$$

наведені на рис. 2-4.

Розрахунки проведені для таких параметрів пластинки і кільця: $E_0/\sqrt{E_x E_y} = 5$; $h_0/h = 4/3$; $h_0/\eta = 3$; $2\eta/\rho = 0.1$; $\alpha_0 = 2\pi/3$; $p = 1$; $q = 0$. Характеристики ортотропних матеріалів і лінії, які відповідають цим матеріалам, наведено в таблиці 1.

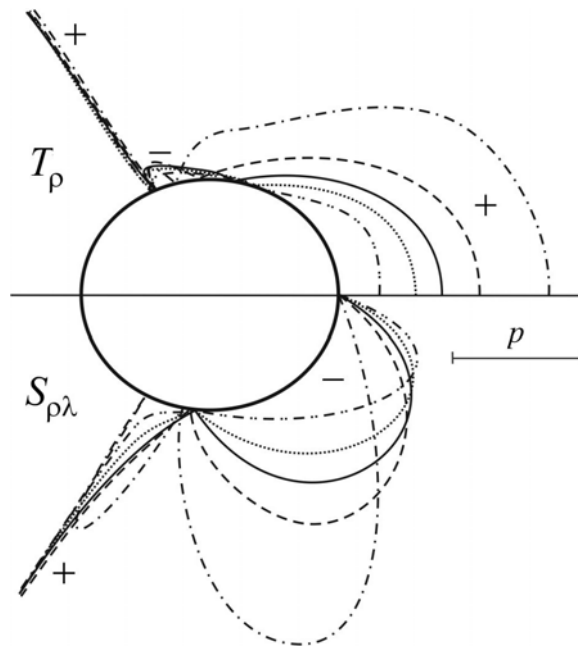


Рис. 2. Розподіл контактних зусиль T_ρ , $S_{\rho\lambda}$ на ділянці сполучення пластинки і кільця

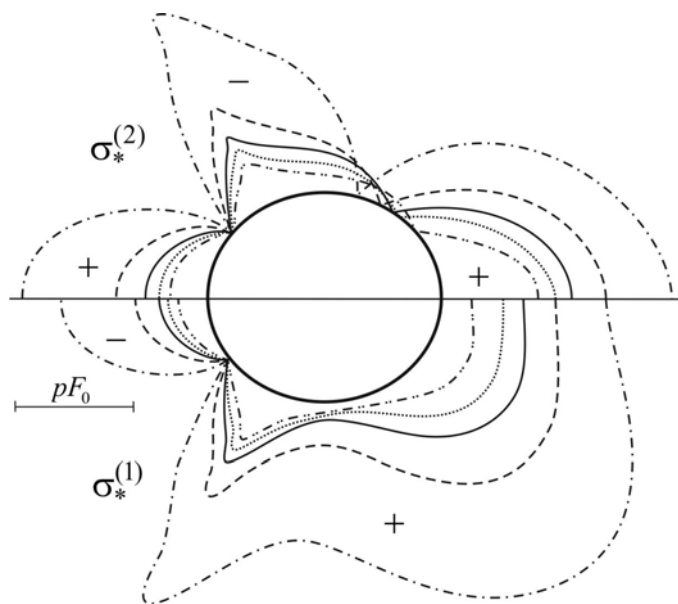


Рис. 3. Розподіл нормальних напружень σ_* в зовнішньому (нижня частина) і внутрішньому (верхня частина) поздовжніх волокнах кільця

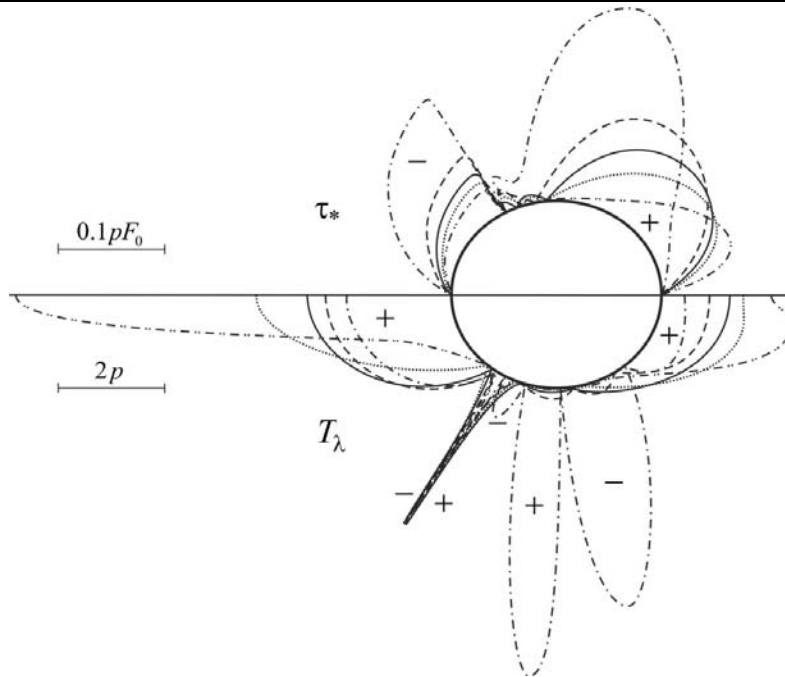


Рис. 4. Розподіл найбільших дотичних τ_* напружень в осьовому волокні кільця (верхня частина) та кільцевих зусиль T_λ на контурі Γ (нижня частина)

Таблиця 1

Характеристики досліджуваних матеріалів

Матеріал пластинки	β_1	β_2	ν_x	E_x/E_y	Лінії
ізотропний матеріал	1	1	0.300	1	—————
скло-епоксид	2.2712	0.7626	0.250	3	-----
графіт-епоксид	6.9992	0.7144	0.250	25	- · - · - · -
епоксид-скло	0.4400	1.3100	0.083	1/3
епоксид-графіт	0.1430	1.4010	0.010	1/25	- · · - · · -

Висновки

- Аналізуючи одержані результати, приходимо до таких висновків:
- для всіх розглянутих ортотропних матеріалів поперечні сили значно менші від інших силових факторів у підсиленні, тому при інженерних розрахунках ними можна знехтувати;
 - ортотропія матеріалу пластинки суттєво впливає на розподіл компонент напруженого стану в пластинці і кільці. При збільшенні відношення E_x/E_y всі розрахункові величини крім T_λ різко зростають;
 - в околі торців міжфазного розрізу нормальні напруження в крайніх поздовжніх волокнах кільця різко змінюють знаки, залишаючись обмеженими, а контактні і кільцеві зусилля приймають необмежені значення, що свідчить про наявність в цих зонах локальних пластичних деформацій.

Література

1. Мартынович Т.Л. Контактные взаимодействия пластин с упругими элементами / Т.Л. Мартынович, В.Е. Юринец. – Львов : Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1984. – 160 с.
2. Божидарнік В.В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно-армованих композитів / В.В. Божидарнік, О.Є. Андрейків, Г.Т. Сулим. – Луцьк : Надстир'я, 2007. – Т. 2. – 422 с.
3. Сулим Г.Т. Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими включеннями / Г.Т. Сулим. – Львів : Дослідно-видавничий центр НТШ, 2007. – 716 с.
4. Сяський А.О. Дослідження впливу міжфазної тріщини на міцність ізотропної пластинки з підкріпленням круговим отвором / А.О. Сяський, Н.В. Шевцова // Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій : матеріали Міжнародної наукової конференції. – Рівне : Червінко А.В., 2018. – С. 250–251.
5. Говоруха В.Б. Моделі та методи механіки руйнування п'єзокерамічних тіл з міжфазними тріщинами / В.Б. Говоруха, В.В. Лобода. – Дніпропетровськ : Видавництво Дніпропетровського національного університету, 2013. – 252 с.

6. Мартиняк Р.М. Контактні задачі термопружності для міжфазних тріщин в біматеріальних тілах / Мартиняк Р.М., Середницька Х.І. – Львів : Растр-7, 2017. – 168 с.
7. Сяський А.О. Контактна взаємодія розімкнених стрижнів змінної жорсткості з еліптичним отвором нескінченної ортотропної пластинки / А.О. Сяський, Ю.В. Батишкіна // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – Т. 9, № 3. – С. 1–24.
8. Сяський А. Застосування методу сил для статичного розрахунку замкнених криволінійних стрижнів / А. Сяський, Н. Шевцова // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2015. – Т. 79, № 3. – С. 24–30.
9. Сяський А.А. Упругое равновесие пластинки с частично подкрепленным отверстием / А.А. Сяський // Прикл. математика и механика. – 1986. – Т. 50, № 2. – С. 247–254.

References

1. Martynovych T.L. Kontaktnye vzaimodeystviya plastyn s uprugimi elementami / T.L. Martynovych, V.E. Yurynets. – Lvov: Vyshcha shkola. Yzd-vo pry Lvov. un-te, 1984. – 160 s.
2. Bozhydamnik V.V. Mekhanika ruinovannia, mitsnist i dovhovichnist neperervno-armovanykh kompozytiv / V.V. Bozhydamnik, O.YE. Andreykiv, H.T. Sulym. – Lutsk: Nadstyria, 2007. – Volume 2. – 422 s.
3. Sulym H.T. Osnovy matematychnoyi teoriiy termopruzhnoyi rivnovahy deformivnykh tverdych til z tonkymy vkluchennyamy / H.T. Sulym. – Lviv: Doslidno-vydavnychy tsestr NTSH, 2007. – 716 s.
4. Syaskyy A.O. Doslidzhennia vplyvu mizhfaznoyi trishchyny na mitsnist izotropnoyi plastynky z pidkriplenym kruhovym otvorom / Syaskyy A.O., Shevtsova N.V. // Suchasni problemy matematychnoho modelyuvannya, obchyslyvalnykh metodiv ta informatsiynykh tekhnolohiy: Materialy Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi. – Rivne: Chervinko A.V., 2018. – S. 250-251.
5. Hovorukha V.B. Modeli ta metody mekhaniky ruinovannya pyezokeramichnykh til z mizhfaznymy trishchynamy / V.B. Hovorukha, V.V. Loboda. – Dnipropetrovsk: Vydavnytstvo Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu, 2013. – 252 s.
6. Martyniak R.M. Kontaktni zadachi termopruzhnosti dlya mizhfaznykh trishchyn v bimaterialnykh tilakh / Martyniak R.M., Serednytska KH.I. – Lviv: Rastr-7, 2017. – 168 s.
7. Siaskyi A. Kontaktna vzaiemodiia rozimknykh stryzhniv zminnoi zhorstkosti z eliptychnym otvorom neskinchennoi ortotropnoi plastynky / A. Siaskyi, Yu. Batyshkina // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho universytetu. – 2004. Volume 9, Part 3. – S. 17–24.
8. Siaskyi A. Zastosuvannya metodu syl dlya statychnoho rozrakhunku zamknykh kryvoliniynykh stryzhniv / A. Siaskyi, N. Shevtsova // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – 2015. – Volume 79, Part 3. – S. 24-30.
9. Siaskyi A.A. Upruhoe ravnovesye plastynky s chastychno podkreplennym otverstyem / A.A. Siaskyi // Prykl. matematika y mekhanika. – 1986. – Volume 50, Part 2. – S. 247-254.

Рецензія/Peer review : 25.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бомба А.Я.

ВИЗНАЧЕННЯ КЛАСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІФТОВИХ УСТАНОВОК

Проведено аналіз впливу енергозберігаючих заходів в ліфтовій установці. На прикладі ліфту ЛП-0307БК на клас енергоспоживання.

Ключові слова: ліфтова установка, енергозбереження, клас енергоспоживання, електропривод, споживачі енергії.

K.O. BRATKOVSKA, YU.B. LIUSH, V.V. KUTYK

Zaporizhia State Engineering Academy

CONCERNING THE DEFINITION OF THE CLASS OF ENERGY EFFICIENCY OF ELEVATOR INSTALLATIONS

The work is devoted to the analysis of energy consumption by the elevator installation and determination of the energy efficiency class on its basis. The influence of energy saving measures on the level of energy consumption is estimated. Total energy savings after modernization is 64%, which is almost UAH 6,000 in cash equivalent. However, the further improvement of the class of energy efficiency of the lift installation is impossible, since modern technologies are used only in elevators with lifting capacity of 630 kg and lifting height of 16 floors. The urgent research direction is to determine the priority of implementing various energy saving measures for specific types of lift installations. Conclusions. Energy saving in elevator installations will reduce the cost of maintaining elevator installations, as well as repairs of elevators that have exhausted their service life by upgrading. The introduction of modern technologies into the elevator industry will not only reduce costs, but also make the use of elevators more comfortable and reliable.

Key words: elevator, energy saving, energy consumption class, electric drive, energy consumers.

За статистичними даними в Україні зараз експлуатується 84 тис. ліфтів, з них 49,2 тис. одиниць (58,6% ліфтового парку) вичерпали свій термін служби, який становить 25 років [1]. Впровадження реформ у сфері житлово-комунального господарства (ЖКГ) дозволило мешканцям багатопверхівок створити власні об'єднання співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ), що надає змогу розпоряджатися своїми грошами для проведення ремонтів та модернізації. Тому особливо актуальним є впровадження енергозберігаючих у ліфтовому господарстві, оскільки оплата комунальних послуг виросла в декілька разів, а платежі за утримання ліфтового господарства є однією з суттєвих складових витрат на обслуговування будинку.

Визначення класу енергетичної ефективності будь-якої ліфтової установки ґрунтується на укрупнених розрахунках, які ускладнюються значними розбіжностями статистичних даних про експлуатаційні характеристики ліфта, а саме: кількість пусків за добу, відстань поїздок, завантаженість кабіни та ін. Тому доцільним є дослідити вплив енергозберігаючих заходів на показники енергетичної ефективності ліфтової установки в залежності від вихідних експлуатаційних характеристик.

Більше 50% всієї електроенергії, яка використовується при експлуатації ліфтів, споживає лебідка ліфта (електропривід), тому основна увага при проектуванні сучасних конструкцій ліфтів відводиться поліпшенню енергетичних показників саме лебідок. Традиційні лебідки пасажирських ліфтів, які експлуатуються в Україні з 70-х років минулого століття, мають в своєму складі одно- і двошвидкісні асинхронні електродвигуни та черв'ячні редуктори. Коефіцієнт корисної дії (ККД) такої лебідки невеликий, він становить близько 60% в усталеному русі і не перевищує 12-15% в період розгону [2].

Підвищення класу енергетичної ефективності ліфтової установки може відбуватися впровадженням таких заходів: відключення освітлення шахти в режимі експлуатації та включення освітлення при технічних оглядах, обслуговування та ремонтах – згідно з Правилами будови і безпечної експлуатації ліфтів [3]; заміна ламп розжарювання на світлодіодні лампи в системі освітлення шахти ліфту; заміна ламп розжарювання на світлодіодні лампи в системі освітлення кабіни ліфту; заміна головного електроприводу на новий з більшим ККД; встановлення частотного перетворювача на головний електропривод; заміна старого головного електроприводу на новий в парі з частотним перетворювачем; використання систем логістики в керуванні ліфтами; використання інтелектуальних контролерів.

Найбільший ефект можна отримати в результаті повної заміни ліфту на новий енергоефективний з системами рекуперації та регенерації енергії. Питанням енергозбереження в ліфтових установках присвячені роботи Бойко А. А. [2, 4], Хитрова А.И та Хитрова А. А. [5], Богданова Є. П. та Рікконе В. В. [6], Смотровая Е. А. та Суботіна В. В. [7], Кувати А. С. та інших [8], Галкіна А. А. [9], де розглядається перехід від не регульованого електроприводу до регульованого, зниження втрат енергії в лебідках тобто підвищення їх ККД, використання частотних перетворювачів, створення програмних алгоритмів для керування роботою ліфтів, а також застосування рекуперативних та регенеративних технологій.

Але в цих роботах недостатньо уваги приділено оцінці загальної енергетичної ефективності ліфтової установки в результаті впровадження енергозберігаючих заходів, що дозволить ранжувати останні та визначати пріоритетність їх впровадження.

Розрахункове споживання електроенергії ліфтовою установкою виконується за міжнародним стандартом ISO 25745-2:2015 «Ліфти, ескалатори та конвеєри пасажирські. Частина 2. Розрахунок

енергоспоживання та класифікація енергетичної ефективності ліфтів» [10]. Як вихідні використовуються наступні технічні та експлуатаційні дані: потужність електродвигунів головного та дверей кабіни, потужність ламп освітлення, відстань руху та часу руху кабіни ліфту, час роботи освітлення та роботи дверей кабіни, а також кількість пусків на добу.

Клас енергетичної ефективності визначається для кожної ліфтової установки індивідуально, так як залежить від таких факторів, як: показник рівня енергоспоживання ліфту в режимі руху ($E_{p.p}$), вантажопідйомність установки (Q), кількість пусків на добу (n_d), середня відстань поїздки (L_{cp}), показник рівня енергоспоживання ліфту в режимі очікування ($P_{p.o}$) та час знаходження в режимі очікування ($t_{p.o}$).

Показник рівня енергоспоживання ліфтової установки в режимах руху та очікування встановлюють в залежності від значення питомого енергоспоживання у відповідному режимі згідно з табл. 1.

Таблиця 1

Показники рівня енергоспоживання ліфту в режимах руху та очікування

Рівень енергоспоживання	1	2	3	4	5	6	7
Питома енергія в робочому стані для середнього циклу пересування, $E_{p.p}$ Вт·год/кг·м	≤0,72	≤1,08	≤1,62	≤2,43	≤3,65	≤5,47	>5,47
Потужність в режимі очікування, $P_{p.o}$ Вт	≤50	≤100	≤200	≤400	≤800	≤1600	>1600

Середня довжина поїздки в одному напрямі для ліфтової установки (L_{cp}), визначається за формулою [10].

$$L_{cp} = \frac{L_{cp} \% \cdot L_{б.ц}}{100}, \text{ м.} \quad (1)$$

де $L_{б.ц}$ – довжина базового циклу підйому ліфту, відповідає висоті підйому ліфту, м. $L_{cp} \%$ – значення відношення середньої довжини поїздки до повної висоти підйому залежно від числа зупинок та категорії використання ліфтової установки, обирається згідно з табл. 2 [10].

Таблиця 2

Середня відстань поїздки

Категорія використання	1–3	4	5	6
Число зупинок	Відношення середньої довжини поїздки до повної висоти підйому			
2	100%			
3	67%			
>3	49%	44%	39%	32%

На основі цієї інформації визначається клас енергетичної ефективності ліфтової установки:

$$W_d \leq \frac{E_{p.p} \cdot Q \cdot n_d \cdot L_{cp}}{1000} + P_{p.o} \cdot t_{p.o} \quad (2)$$

Клас енергетичної ефективності ліфта встановлюють шляхом порівняння добового енергоспоживання, обчисленого за показниками рівнів ефективності для режимів руху та режиму очікування відповідно до таблиці 1, згідно з міжнародним стандартом ISO 25745-2:2015 [10].

Добове споживання електроенергії ліфтовою установкою визначається за наступною формулою:

$$W_d = W_{p.p} + W_{p.o} + W_{осв.шахти} \quad (3)$$

де $W_{p.p}$ – споживання енергії в режимі руху кабіни, Вт·год. $W_{p.o}$ – споживання енергії в режимі очікування, Вт·год. $W_{осв.шахти}$ – споживання енергії на освітлення ліфтової шахти, Вт·год.

Структура споживання електроенергії ліфтом ЛПО307БК вантажопідйомністю 320 кг за напрямками енергоспоживання (за власними розрахунками) наведено на рис. 1.

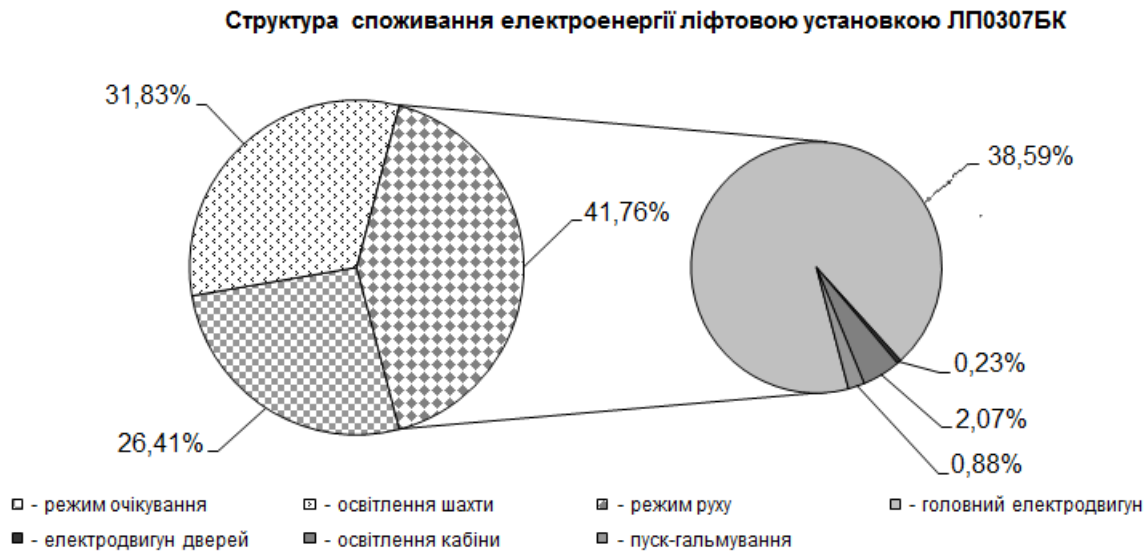


Рис. 1. Структура споживання електроенергії ліфтовою установкою за добу (власні розрахунки)

На базі розрахункового споживання електроенергії ліфтовою установкою можна виділити три основні складові: споживання у режимі руху ліфта 41,76 %, яке в свою чергу складається з чотирьох складових, а саме: споживання головним електродвигуном 38,59 %, освітлення ліфтової кабіни 2,07 %, витрати на перехідні процеси пуску та гальмування 0,88 % та споживання енергії електроприводом дверей 0,23 %; споживання у режимі очікування – 31,84 %; освітлення шахти – 26,41 %.

Для зниження споживання електроенергії та класу енергетичної ефективності ліфтової установки ЛП0307БК запропоновано наступні заходи модернізації наведено в табл. 3: відключення освітлення шахти в режимі експлуатації та включення освітлення при технічних оглядах, обслуговуванні та ремонтах, економія електроенергії 26,4%; заміна ламп розжарювання на світлодіодні лампи в системі освітлення кабіни ліфту, економія електроенергії 2,5%; заміна старого головного електропривода на новий в парі з частотним перетворювачем, економія електроенергії 35,1% (розрахунок виконувався при припущенні, що встановлення частотного перетворювача дає економію енергії на рівні 50 % в режимі руху, згідно досліджень Хитрова А. И. [5]).

При розрахунку було прийнято, що режим руху на добу становив 2,35 години, середня кількість пусків за добу 300, середня відстань поїздки 17,15 м, а час в режимі очікування прийнято 21,65 год.

Таблиця 3

Технічні показники ліфтової установки до та після модернізації

Техніко-економічні показники	До модернізації	Після модернізації
Потужність двигуна, кВт	3,5	4
Швидкість руху кабіни, м/с	0,71	1
Тип приводу	не регульований	регульований
Споживана електроенергія, Вт·год:		
• на добу	15,08	5,39
• на рік	5450	1961
Витрати на електроенергію за рік, тис. грн.	9,16	3,3
Клас енергетичної ефективності	Е	С

Загальна економія електроенергії після модернізації складає 64 %, що у грошовому еквіваленті становить майже 6 тис грн.

Проте подальше підвищення класу енергетичної ефективності ліфтової установки є неможливим, оскільки сучасні технології застосовуються лише на ліфтових установках з вантажопідйомністю від 630 кг та висотою підйому від 16 поверхів.

Актуальним напрямом досліджень є визначення пріоритетності впровадження різних енергозберігаючих заходів для конкретних типів ліфтових установок.

Висновки. Енергозбереження в ліфтових установках дозволить знизити витрати на утримання ліфтових установок, а також на ремонти ліфтів, які вичерпали свій термін служби шляхом модернізації. Впровадження сучасних технологій в ліфтове господарство дозволить не тільки скоротити видатки, але й зробити користування ліфтами комфортніше та надійніше.

Література

1. Українські ліфти в стані вільного падіння [Електронний ресурс] // Україна комунальна – головний експерт житлово-комунального господарства України. – Режим доступу : <http://osbb.jkg-portal.com.ua/ua/publication/one/-lftove-gospodarstvo-modernizacii-ne-bude-44169> – 02.02.2018 р.
2. Бойко А. А. Разработка методологии оптимального проектирования и эксплуатации энергоэффективных лебедок пассажирских лифтов : диссертация / А. А. Бойко. – Одесса 2015. – 402 с.
3. Наказ державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гігієнічного нагляду «Про затвердження Правил будови і безпечної експлуатації ліфтів» від 7 жовтня 2008 р. № 190 [Електронний ресурс] / Верховна рада України/ – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0937-08>. – 02.02.2018.
4. Бойко А. А. Анализ энергетических показателей традиционного редукторного подъемного механизма пассажирского лифта с двускоросным асинхронным двигателем / А. А. Бойко // Региональные проблемы энергетики – Кишинэу (Молдова) : Изд-во ГЭИРМ, 2014. – № 1 (24). – С. 17–25.
5. Хитров А. И. Перспективы применения энергосберегающих решений в электроприводах главного движения лифта / А. И. Хитров, А. А. Хитров // Труды Псковского политехнического института. – Псков : Изд-во ППИ, 2011. – № 14.3. – С. 367–376.
6. Богданов Е. П. Сравнительный анализ потерь в двигателях редукторных лебедок лифтов [Электронный ресурс] / Е. П. Богданов, С. В. Рикконен // Интернет-журнал Института Государственного управления, права и инновационных технологий (ИГУПИТ) «Науковедение». – 2013. – № 1. – Режим доступа : <https://naukovedenie.ru/PDF/65tvn113.pdf>. – 19.04.2018 г.
7. Смотров Е. А. Рекуператор электропривода лифта / Е. А. Смотров, В. В. Субботин // Журнал Электрические и компьютерные системы. – Одесса : Изд-во ОНПУ, 2014. – № 16 (92). – С. 16–25.
8. Коваль А. С. К вопросу совершенствования электропривода массовых лифтов / А. С. Коваль, А. В. Шваяков, Б. Б. Скарыно, Е. В. Ефименко // Весник Белорусско-Российского университета. – Могилев : Изд-во БРУ, 2011. – № (32). – С. 145–150.
9. Галкин А. А. Исследование без редукторного электропривода лифта с низкоскоросным асинхронным двигателем : диссертация / А. А. Галкин. – Москва, 2011. – 143 с.
10. Расчет энергопотребления и классификация энергетической эффективности лифтов : проект международного стандарта ISO/DIS 25745-2:2015. Часть 2: Измерение энергии и соответствие» [Электронный ресурс] / International Organization for Standardization. – Режим доступу : <https://www.iso.org/standard/60951.html> – 02.02.2018 р.

References

1. Ukrainski lifty v stani vilnoho padinnia [Elektronnyi resurs] // Ukraina komunalna – holovnyi ekspert zhytlovo-komunalnoho gospodarstva Ukrainy. – Rezhym dostupu : <http://osbb.jkg-portal.com.ua/ua/publication/one/-lftove-gospodarstvo-modernizacii-ne-bude-44169> – 02.02.2018 r.
2. Boiko A. A. Razrabotka metodolohyy optimalnoho proektyrovanya y ekspluatatsyy enerhoeffektyvnykh lebedok passazhyrskyykh lyftov : dySSERTatsiya / A. A. Boiko. – Odessa 2015. – 402 s.
3. Nakaz derzhavnoho komitetu Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hiihienichnoho nahliadu «Pro zatverdzhennia Pravyly budovy i bezpechnoi ekspluatatsii lyftiv» vid 7 zhovtnia 2008 r. № 190 [Elektronnyi resurs] / Verkhovna rada Ukrainy/ – Rezhym dostupu : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0937-08>. – 02.02.2018.
4. Boyko A. A. Analiz energeticheskikh pokazateley traditsionnogo reduktornogo podyemnogo mehanizma pasajirskogo lifta s dvuskorosnyim asinhronnym dvigatelem / A. A. Boyko // Regionalnyie problemmyi energetiki – Kishineu (Moldova) : Izd-vo GEIRM, 2014. – № 1 (24). – С. 17–25.
5. Hitrov A. I. Perspektivy primeneniya energosberegayuschih resheniy v elektroprivodah glavnogo dvijeniya lifta / A. I. Hitrov, A. A. Hitrov // Journ. Trudy Pskovskogo politehnicheskogo instituta. – Pskov : Izd-vo PPI, 2011. – № 14.3. – С. 367–376.
6. Bogdanov E. P. Sravnitelnyiy analiz poter v dvigatelyah reduktornih lebedok lyftov [Elektronnyi resurs] / E. P. Bogdanov, S. V. Rikkonen // Internet-jurnal Instituta Gosudarstvennogo upravleniya, prava i innovatsionnyih tehnologiy (IGUPIT) «Naukovedenie». – 2013. – № 1. – Rejim dostupa : <https://naukovedenie.ru/PDF/65tvn113.pdf>. – 19.04.2018 g.
7. Smotrov E. A. Rekuerator elektroprivoda lifta / E. A. Smotrov, V. V. Subbotin // Jurnal Elektricheskie i kompyuternye sistemyi. – Odessa : Izd-vo ONPU, 2014. – № 16 (92). – С. 16–25.
8. Kovat A. S. K voprosu sovershenstvovaniya elektroprivoda massovyih lyftov / A. S. Koval, A. V. SHvayakov, B. B. Skaryino, E. V. Efimenko // Vesnik Belurussko-Rossiyskogo universiteta. – Mogilev : Izd-vo BRU, 2011. – № (32). – С. 145–150.
9. Galkin A. A. Issledovanie bez reduktornogo elektroprivoda lifta s nizkoskorosnyim asinhronnym dvigatelem : dissertatsiya / A. A. Galkin. – Moskva, 2011. – 143 s.
10. Raschet eneropotrebleniya i klasifikatsiya energiticheskoy effektivnosti lyftov : projekt mejdnarodnogo standarta ISO/DIS 25745-2:2015. CHast 2: Izmerenie energii i sootvetstvie» [Elektronnyi resurs] / International Organization for Standardization. – Rejim dostupu : <https://www.iso.org/standard/60951.html> – 02.02.2018 r.

Рецензія/Peer review : 25.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.

Рецензент: к.т.н., проф. В.П. Метельський

С.М. БОЙКО, І.В. НОСАЧ

Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету

С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ

Вінницький національний технічний університет

А.В. НЕКРАСОВ, Є.М. КАС'ЯНОВ

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ПОТОКУ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ З МЕТОЮ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Одним із чотирьох заходів, запропонованих Міжнародною енергетичною агенцією для підвищення енергоефективності в країнах світу, є збільшення використання вітрової енергії в загальному обсязі виробництва електричної енергії [1]. Внаслідок природного зниження рівнів видобутку залізорудної сировини (ЗРС) на понад 1000–1500 м, тобто в бік запроектованих показників, вже зараз необхідно збільшувати об'єми повітря для вентиляції. Існуюча перепроектована система вентиляції за нагнітально-всмоктувальним принципом дозволяє забезпечити необхідні обсяги, зменшити втрати і збільшити швидкість потоку повітря [2–4]. За таких умов можливим є використання частини енергії вітрових потоків для перетворення її в електричну [1] з метою використання для резервного живлення відповідальних споживачів. Безумовно, обсяги отриманої електроенергії не можуть бути значними через просторову обмеженість гірничих виробок. Разом з тим, підземні електроприймачі шахт, як правило, мають значні потужності й їх живлення від автономних джерел, зокрема вітроенергетичних установок (ВЕУ), є неможливим [5]. Особливо актуальними ці питання є для тимчасово законсервованих горизонтів шахт. Останні, як правило, відключені від централізованого електропостачання підземних підстанцій. Вітроенергетичний комплекс, встановлений в законсервованих виробках залізорудних шахт, здатний, перетворюючи частину енергії вентиляційних повітряних потоків у електричну енергію, забезпечувати аварійне резервне електропостачання освітлювальної мережі для виконання умов техніки безпеки [6]. Для досягнення належної енергоефективності ВЕУ в таких умовах необхідно враховувати низку додаткових вимог до них і, насамперед, до їх електромеханічної частини. Вони стосуються вибору типу та параметрів складових останньої, а також конструктивних особливостей приводного механізму електрогенератора [3–9].

Ключові слова: енергоефективність, вітроенергетичні установки, резервне живлення відповідальних споживачів, залізорудні шахти, підземні електроприймачі.

S.M. BOIKO, I.V. NOSACH

Kremenchuk Flight College of the National Aviation University

S.YA. VYSHNEVSKIY

Vinnytsia National Technical University

A.V. NEKRASOV, YE.M. KAS'IANOV

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

THE USE OF ENERGY POTENTIAL OF EXHAUSTED VENTILATION FLOW OF IRON ENTERPRISES WITH THE PURPOSE OF GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY

One of the four measures proposed by the International Energy Agency for improving of energy efficiency in the countries of the world is increasing of the use of wind energy in the total electricity production [1]. Due to the natural decrease in the levels of iron ore (IOE) extraction by more than 1000-1500 m, that is towards the design indicators, it is now necessary to increase the volume of air for ventilation. The existing redesigned ventilation system according to the injection suction principle allows to provide the necessary volumes, reduce losses and increase the air flow rate [2–4]. Under such conditions, it is possible to use part of the energy of wind streams to convert it into electrical power [1] in order to use for backup power supply of responsible customers. Of course, the amount of generated electricity can not be significant due to the spatial limitation of mining work. At the same time, underground electrical collectors of mines, as a rule, have significant capacity and their nutrition from autonomous sources, in particular from wind power turbines (WPT), is impossible [5]. These issues are particularly relevant for temporarily preserved horizons of mines. The latter, as a rule, are disconnected from the centralized power supply of underground substations. The wind power complex installed in the preserved development of iron ore mines is capable providing an emergency back-up power supply to the lighting network to fulfill the safety conditions turning a part of the energy of ventilation air streams into electric energy [6]. In order to achieve the proper energy efficiency of the wind turbine in such conditions it is necessary to take into account a number of additional requirements to them and, first of all, to their electromechanical part. They concern the choice of the type and parameters of the components of the latter, as well as the design features of the drive mechanism of the generator [3–9].

Key words: energy efficiency, wind power turbines, reserve power of responsible consumers, iron ore mines, underground electric collectors.

Аналіз попередніх досліджень

Раніше було запропоновано встановлення вітроустановки на спряженні квершлагів – порожнякового та вантажного – в пристінній ділянці, що використовує вентиляційний потік повітря, не змінюючи його напрям та мало впливаючи на його потужність, оскільки основний потік проходить повз установку. Для перетворення використовується та частина вентиляційного потоку, яка зазнає взаємодії зі стінами гірничої виробки. Вентиляційний потік в шахтах є стабільним, оскільки регламентується відповідними вимогами техніки безпеки. Однак його швидкість не перевищує 15 м/с, що не дозволяє забезпечити значних обсягів виробленої енергії.

Мета дослідження

Метою є оцінка потенціалу відпрацьованого вентиляційного потоку залізрудних підприємств для подальшого перетворення його кінетичної енергії в електричну.

Матеріал та результати дослідження

Згідно з законодавчими актами та правилами техніки безпеки для забезпечення нормальних умов праці гірників в шахтах впроваджуються системи штучної вентиляції. До загально шахтної вентиляційної системи входять головні та місцеві вентиляційні установки.

Існують два основні способи штучного провітрювання гірничих виробок: всмоктувальний та нагнітально-всмоктувальний. В зв'язку зі значним зниженням рівня видобутку ЗРС в сучасних шахтах глибиною до 1500 м перспективним є нагнітально-всмоктувальний спосіб на відміну від існуючого всмоктувального, який є неефективним в сучасних умовах шахт. З метою оцінювання сучасного стану вентиляційних параметрів типових залізрудних шахт України фахівцями проведено відповідний аналіз. В результаті було виявлено ряд проблем функціонування підземних вентиляційних систем шахт [5].

У провітрюваних гірських виробках рух повітря завжди є турбулентним. Ламінарний режим руху може спостерігатися за наявності фільтраційного потоку повітря з невеликою швидкістю вузькими каналами (просочування повітря через перемички, ущільнені ділянки обвалів у виробленому просторі та ін.). Проміжні режими спостерігаються за умови руху повітря у виробленому просторі.

В той же час, вітчизняні залізрудні підприємства є найбільш підготовленими для втілення в практику функціонування їхніх систем електропостачання міні- та мікроелектростанцій на базі відновлюваних джерел енергії.

Шахтна вентиляційна система, зазвичай, знаходиться в квазістаціонарному стані (в середньому є стаціонарною).

Природна тяга в шахтах може виникати за наступних умов [10, 11]:

- за наявності декількох виходів на земну поверхню, особливо якщо ці виходи знаходяться на різних висотних відмітках;
- в окремих виробітках при різній густині повітря по периметру виробітки;
- між окремими горизонтами, якщо повітропостачальних стволів кілька.

За ЕПБ забороняється провітрювання шахт за рахунок тільки природної тяги. Але природна тяга в багатьох випадках відіграє істотну роль в вентиляції шахти. У деяких шахтах депресія природної тяги досягає 25% депресії вентиляторів головного провітрювання.

В шахтах трапляються випадки, коли вертикальні або нахилені виробітки поєднані на декількох горизонтах (рис. 1). У таких випадках на кожному горизонті діє своя природна тяга, яка визначається густиною повітря на ділянках, розташованих вище даного горизонту [11].

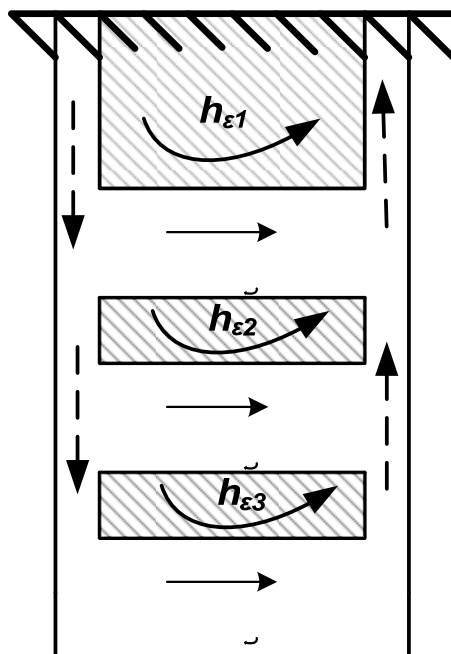


Рис. 1. Визначення депресивної тяги при одночасному з'єднанні виробок між собою на декількох горизонтах

Фактори, що впливають на природну тягу [4]:

- температура повітря в гірничих виробках (визначає його густина);
- температура повітря на поверхні;
- температури стовпів повітря, які знаходяться над різними входами в шахту в гористій місцевості;
- тиск повітря поверхні землі (визначає густина повітря).

Зі збільшенням глибини шахти депресія природної тяги змінюється експотенціально.

Взимку депресія природної тяги дещо збільшується. Влітку відбувається зворотне явище. Так як ці зміни незначні, тому характеристика природної тяги вважається постійною, тобто такою, що не залежить від витрати повітря [9].

У зв'язку з цим для розрахунку депресії природної тяги можуть застосовуватися гідростатичні і термодинамічні методи.

Для розрахунку природної тяги гідростатичним методом визначається різниця аеростатичних тисків повітря в двох стовбурах, між стовбурами або горизонтами.

За формулою М. М. Протодяконова [11]:

$$h_e = H(Y_{\bar{I}} - Y_{\bar{E}}), \text{ Па}, \quad (1)$$

де H – глибина шахти, м; $Y_{\bar{I}}$ і $Y_{\bar{E}}$ – середнє значення питомої ваги повітря відповідно, що надходить і що виходить повітряним струменем, Н/м^3 .

Середнє значення питомої ваги повітря визначається з виразу [9]:

$$\gamma = 0,0171 \left(\frac{p_1}{273 + t_1} + \frac{p_2}{273 + t_2} \right), \text{ Н/м}^3, \quad (2)$$

де p_1 і p_2 – тиск на початку та наприкінці вхідного та вихідного струменя, Па; t_1 і t_2 – температура повітря в тих же точках, $^{\circ}\text{C}$ (величину t_1 визначають в стовбурі на глибині $20 \div 30$ м).

Влітку питома вага надходить в шахту повітря менше вихідного, тому депресія природної тяги знижується в неглибоких шахтах і може бути навіть від'ємною.

У глибоких шахтах внаслідок високої температури повітря у висхідному струмені депресія природної тяги, переважно, додатна [10].

$$h_e = 0.046 H (t_{\bar{I}} - t_{\bar{A}}), \text{ Па}, \quad (3)$$

де H – різниця абсолютних відміток глибини виробок, що постачають і споживають повітря, м; $t_{\bar{I}}$, $t_{\bar{A}}$ – середня температура повітря відповідно в стволах, якими воно надходить в шахту і видається з неї, $^{\circ}\text{C}$.

Для шахт з різними висотними відмітками глибини виробок, що постачають і споживають повітря, можна використовувати наступну формулу:

$$h_e = Y_{\bar{n}\delta} H \frac{t_{\bar{I}} - t_{\bar{n}\delta}}{273 + t_{\bar{n}\delta}}, \text{ Па}, \quad (4)$$

де Y_{cp} – середньоконтурна питома вага повітря, Н/м^3 ; H – різниця глибини виробок, що постачають і споживають повітря, м; t_H – температура зовнішнього повітря повітропостачальної виробки, $^{\circ}\text{C}$; t_{cp} – середня температура рудничного повітря $^{\circ}\text{C}$.

Питома вага повітря визначається за формулою [9]:

$$Y = 4,459 \frac{\rho}{273 + t}, \text{ Н/м}^3, \quad (5)$$

де ρ – атмосферний тиск повітря, Па; t – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Вентилятор включається в шахтну вентиляційну мережу по одній з схем, показаних на рис. 2 [9–11].

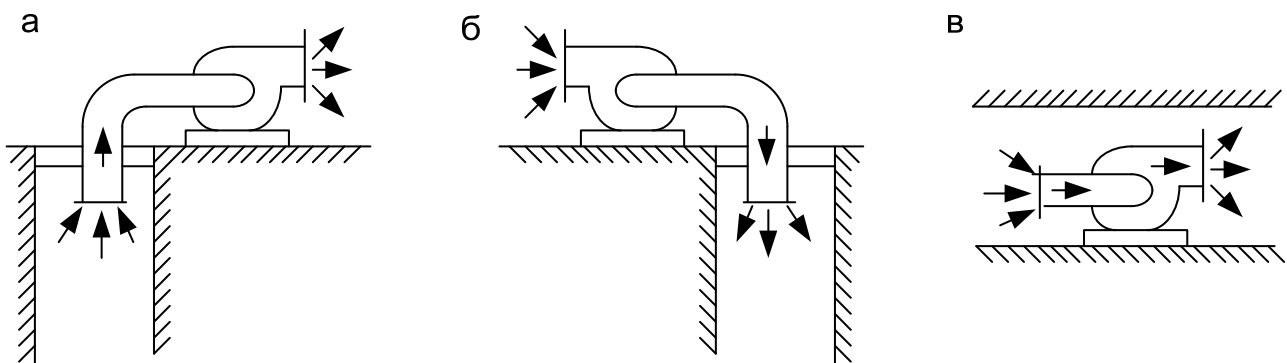


Рис. 2. Схеми включення вентилятора в мережу при роботі на: а – всмоктування; б – нагнітання; в – всмоктування і нагнітання

У турбулентному потоці повітря виникають вихрові потоки. Великі вихори є нестійкими та розпадаються на дрібніші, стійкість яких вища, але істотно залежить від в'язкості повітряного середовища. Це призводить до дисипації їх механічної енергії. Отже, турбулентний потік повітря у підземних виробках представляє собою потік вихорів різного розміру від найбільших, розміри яких можуть бути рівними поперечним розмірам виробки, до найдрібніших. Зміна в часі подібних вихорів створює в кожній точці повітряного потоку хаотичні коливання миттєвих швидкостей. Число Рейнольдса характеризує співвідношення між силами інерції і силами тертя в повітряному потоці [9].

$$Re = \frac{\rho u l}{\eta} = \frac{u l}{\nu}, \quad (6)$$

де ρ – густина повітря; l – характерний лінійний розмір; η – динамічна в'язкість; Re – число Рейнольдса; u – швидкість повітря; ν – кінематична в'язкість повітря.

На роботу ВЕУ в умовах залізрудних шахт (ЗРШ) суттєво впливають інерційні сили, фізичні особливості потоку повітря, форма виробок, розташування ВК відносно напрямку руху повітряного потоку у підземній виробці, а також форма лопатей вітрового колеса (ВК).

Детальне вивчення всіх складових процесу впровадження ВЕУ в умовах ЗРШ є досить всебічним, багатогранним, науково містким і технічно складним процесом, який має забезпечити оптимальні умови впровадження та роботи ВЕУ.

Таким чином запропоновано такі способи розміщення ВЕУ в умовах шахт для роботи на енергії незадіяних та відпрацьованих повітряних вентиляційних потоках, які показані на рис. 3.

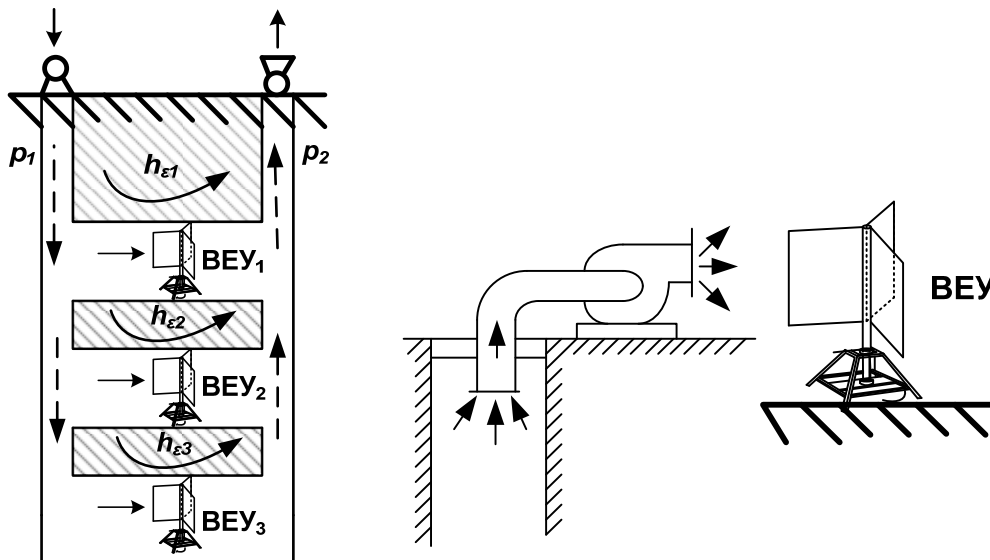


Рис. 3. Способи розміщення вітроенергетичних установок в умовах шахт для роботи на енергії незадіяних та відпрацьованих повітряних вентиляційних потоках

ВЕУ можуть бути застосовані для автономного живлення споживачів електричної енергії залізрудних шахт [9–12]. Раніше встановлено, що енергоефективним варіантом структури енергетичного комплексу таких ВЕУ є система з асинхронним генератором [5].

Висновки

1. Проаналізовано види, способи та особливості функціонування вентиляційної системи на сучасних вітчизняних залізрудних шахтах.
2. Запропоновано способи використання енергії відпрацьованого вентиляційного повітряного потоку залізрудних шахт з метою генерації електричної енергії.

Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mre.kmu.gov.ua>.
2. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року / Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В. та ін. – К. : Вид. Ін-ту електродинаміки НАН України, 2011. – С. 97–99. – ISSN 1997–9266.
3. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев. – М. : Недра, 1985. – 232 с.
4. Бойко С.М. Возможности использования ветрогенераторов для производства электрической энергии в подземных выработках шахт / С. М. Бойко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 97–99. – ISSN 1997–9266.
5. Сінчук О. М. Електромеханічний комплекс вітроенергетичної установки для використання в підземних виробках залізрудних шахт / О. М. Сінчук, С. М. Бойко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/8(67). – С. 13–21. – ISSN 1729–3774.
6. Енергоефективність залізрудних виробств. Оцінка, практика підвищення : монографія / Синчук О.Н., Синчук І.О., Гузов Э.С., Бойко С.М., Яловая А.Н. – Кременчуг : Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing is managed by OmniScriptum Management GmbH, 2016. – 346 с.
7. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения / Праховник А.В. – К. : «Освіта України», 2007. – 464 с.
8. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник / С.О. Кудря. – К. :

Національний технічний університет України («КПІ»), 2011. – 494 с.

9. Сінчук І.О. Відновлювані та альтернативні джерела енергії : навчальний посібник / І.О. Сінчук, С.М. Бойко, О.Є. Мельник. – Кременчук : Вид-во ПП Щербатих О.В., 2015. – 270 с.

10. Голинько, В. И. Состояние и пути повышения эффективности проветривания железорудных шахт / В. И. Голинько, И. А. Евстратенко, Г. П. Кривцун и др. // Сборник научных трудов НГУ. – Днепропетровск, 2004. – № 19. – С. 65–68. – ISSN 2077–1738.

11. Гурін А. О. Аерологія гірничих підприємств / А. О. Гурін, П. В. Бересневич, А. А. Немченко, І. Б. Ошманський. – Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2007. – 262 с. – ISBN 978–966–350–369–1.

12. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / Харитонов В.П. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

References

1. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 r. // Sait Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : <http://mpe.kmu.gov.ua>.

2. Osnovni parametry enerhozabezpechennia natsionalnoi ekonomiky na period do 2020 roku / Stohniі B.S., Kyrylenko O.V., Prakhovnyk A.V. ta in. – К. : Vyd. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. – 275 s.

3. Prahovnik A.V. Energosberegayushchie rejimyі elektrosnabjeniya gornodobyivayuschih predpriyatiy / A.V. Prahovnik, V.P. Rozen, V.V. Degtyarev. – М. : Nedra, 1985. – 232 s.

4. Boiko S.M. Mozhlyvosti vykorystannia vitroheneratoriv dlia vyrobnytstva elektrychnoi enerhii v pidzemnykh vyrobkakh shakht / S. M. Boiko // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2012. – № 2. – S. 97–99. – ISSN 1997–9266.

5. Sinchuk O. M. Elektromekhanichniy kompleks vitroenerhetychnoi ustanovky dlia vykorystannia v pidzemnykh vyrobkakh zalizorudnykh shakht / O. M. Sinchuk, S. M. Boiko // Vostochno-evropeyskyi zhurnalпередовыkh tekhnolohiyi. – 2014. – № 1/8(67). – S. 13–21. – ISSN 1729–3774.

6. Energoeffektivnost jelezorudnykh proizvodstv. Otsenka, praktika povyisheniya : monografiya / Sinchuk O.N., Sinchuk I.O., Guzov E.S., Boyko S.M., YAlovaya A.N. – Kremenchug : Izd LAP LAMBERT Academic Publishing is managed by OmniScriptum Management GmbH, 2016. – 346 s.

7. Prahovnik A.V. Malaya energetika: raspredelennaya generatsiya v sistemah energosnabjeniya / Prahovnik A.V. – К. : «Osvita Ukraїnyi», 2007. – 464 s.

8. Kudria S.O. Netradytsiini ta vidnovliuvani dzhherela enerhii : pidruchnyk / S.O. Kudria. – К. : Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy («KPI»), 2011. – 494 s.

9. Sinchuk I.O. Vidnovliuvani ta alternatyvni dzhherela enerhii : navchalnyi posibnyk / I.O. Sinchuk, S.M. Boiko, O.Ie. Melnyk. – Kremenchuk : Vyd-vo PP Shcherbatykh O.V., 2015. – 270 s.

10. Golinko, V. I. Sostoyanie i puti povyisheniya effektivnosti provetrivaniya jelezorudnykh shakht / V. I. Golinko, I. A. Evstratenko, G. P. Krivtsun i dr. // Sbornik nauchnykh trudov NGU. – Dnepropetrovsk, 2004. – № 19. – S. 65–68. – ISSN 2077–1738.

11. Hurin A. O. Aerolohiia hirnychkykh pidpriemstv / A. O. Hurin, P. V. Beresnevych, A. A. Nemchenko, I. B. Oshmanskyi. – Kryvyi Rih : Vydavnychiy tsentr KNU, 2007. – 262 s. – ISBN 978–966–350–369–1.

12. Haritonov V.P. Avtonomnyie vetroelektricheskie ustanovki / Haritonov V.P. – М. : GNU VIESH, 2006. – 280 s.

Рецензія/Peer review : 8.9.2018 р. Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Сінчук О.М.

УДК 685.34.054

В.С. НЕЙМАК, С.П. ЛІСЕВИЧ, С.В. СМУТКО, Д.В. ПРИБЕГА

Хмельницький національний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО ПРИВОДУ ДЛЯ ПРЕСОВОГО ОБЛАДНАННЯ МАШИН ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ НА БАЗІ ГІДРОШТОВХАЧІВ

Штовхачі представляють собою сукупність двигуна і поступальної передачі, тобто автономного, частіше всього конструктивно компактного, приводу з поступальним рухом робочого органу. Комбінація гідронасоса з поршнем дозволяє вибрати в якості приводу електродвигун з відносно невеликою потужністю та моментом і при цьому отримати значно збільшену направлену силу. Перспективним є застосування гідроштовхачів в якості приводу для пресового гладильного обладнання. Дана стаття присвячена експериментальним дослідженням автономного приводу на базі гідроштовхачів. Метою досліджень є встановлення відповідності їх силових характеристик вимогам, що висуваються до пресового обладнання легкої промисловості. В основу експериментальних досліджень покладено дослідження часу підйому та опускання штока гідроштовхача під різними навантаженнями, а саме 150, 200, 250 Н. На основі проведеного циклу експериментальних досліджень встановлено, що гідроштовхач має динамічні характеристики, які дозволяють застосовувати його у якості приводу пресового обладнання легкої промисловості для виконання операцій, що не потребують великих технологічних зусиль, таких як вставка блочків, люверсів, пробивання отворів.

Ключові слова: гідроштовхач, пресове обладнання легкої промисловості, пресове гладильне обладнання.

V.S. NEYMAK, S.P. LISEVICH, S.V. SMUTKO, D.V. PRIBEGA

Khmelnytsky National University

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF AUTOMATIC DRIVER FOR PRESSURE EQUIPMENT OF LIGHT INDUSTRY MACHINES ON THE BASIS OF HYDROSTRUCTURES

Pushers represent a combination of engine and translational transmission, that is, an autonomous, often constructively compact, drive with a translatory motion of the working body. The combination of the hydraulic pump and the piston allows you to select as an actuator an electric motor with a relatively small power and moment, and at the same time obtaining a significantly increased directional force. The prospect of the use of hydraulic pushers as a drive for press ironing equipment looks like. Modern hydraulic pushers can provide both pressure and pressure requirements, while having a number of significant advantages over other mechanisms of reciprocating motion. When installing a hydraulic jack on an ordinary hydraulic ironing press, there is no need to install a water boat and pipelines. The preliminary assessment showed the promise of the proposed direction, but for the final answer it was necessary to conduct a series of experimental analytical studies of press ironing equipment with a stand-alone drive on the basis of hydraulic pushers. This article is devoted to experimental research of autonomous drive on the basis of hydraulic pushers in order to establish the conformity of their power characteristics to the requirements put forward for press equipment of light industry. The basis of experimental research is the study of the time of lifting and lowering the rod of a hydraulic shaft under different loads, namely 15, 20, 25 KGs. On the basis of the conducted cycle of experimental studies, it has been established that the hydraulic shock absorber has good dynamic characteristics and can be used as a drive for light industry equipment for operations that do not require major technological efforts, such as insertion of blocks, eyelets, punching holes.

Keywords: hydraulic press, press equipment for light industry, press ironing equipment.

В сучасній легкій промисловості намітилася тенденція до створення великої кількості малих і середніх підприємств, де немає необхідності використовувати високопотужне і, відповідно, енергоємне пресове обладнання. В основному у ньому використовуються електромеханічний, гідравлічний чи пневматичний приводи. Поруч із перевагами це обладнання має і ряд недоліків: висока вартість, громіздкість, низький ККД. На малих і середніх підприємствах, наприклад, при виконанні технологічних операцій тиснення та перфорації, особливо при обробці невеликих деталей вершу взуття, не потрібно такого великого зусилля (450–1000 кН), яке дають звичайні преси.

Аналіз сучасного стану обладнання підприємств легкої промисловості показав необхідність створення такого пресового обладнання, якому притаманні з одного боку: простота, надійність, універсальність; з іншого: відносно низька вартість.

В останні роки широкий розвиток та застосування автоматичних схем управління та регулювання зумовили появу автономних приводів як обертового, так і поступального руху, що використовуються в якості виконавчих механізмів.

Такі механізми з обертовим рухом виконавчого органу достатньо широко описані у вітчизняній та закордонній літературі. Менш відомі так звані штовхачі, що представляють собою сукупність двигуна і поступальної передачі, тобто автономного, частіше всього конструктивно компактного, приводу з поступальним рухом робочого органу [1].

Світова практика конструювання та виготовлення штовхачів насичена великою різноманітністю рішень у цій області. Всі різновиди штовхачів знаходять широке застосування в різних областях техніки, але найбільший розвиток отримали електрогідродинамічні штовхачі, в подальшому називані електрогідравлічними штовхачами [2].

Комбінація гідронасоса з поршнем дозволяє вибрати в якості приводу електродвигун з відносно невеликою потужністю та моментом і, при цьому, отримати значно збільшену направлену силу.

Перспективним виглядає застосування гідроштовхачів в якості приводу для пресового гладильного обладнання. Зроблений висновок базується як на вимогах до пресового гладильного обладнання машин легкої промисловості так і на можливостях гідроштовхачів.

Основна вимога до пресового гладильного обладнання – забезпечення питомого тиску $1,5\text{--}15 \text{ Н/см}^2$ протягом $10\text{--}45 \text{ с}$.

Аналіз технічної літератури та патентів показав, що таке обладнання можна створити шляхом використання автономних приводів, зокрема, гідроштовхачів.

Сучасні гідроштовхачі можуть забезпечити вимоги як по тиску, так і по часу пресування, при цьому мають ряд суттєвих переваг у порівнянні з іншими механізмами зворотно-поступального руху (мала чутливість до перевантажень, невисокий вміст кольорових металів, плавність роботи, досить високий ККД ($0,15\text{--}0,5$), енергоощадливість) [3].

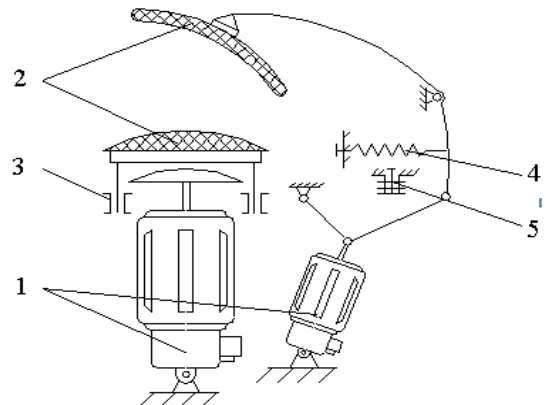


Рис. 1. Схема гладильного преса на базі гідроштовхача: 1 – гідроштовхачі; 2 – гладильні подушки; 3 – направляючі; 4 – зворотна пружина; 5 – кінцевий вимикач-фіксатор

При встановленні гідроштовхача на звичайний гідравлічний гладильний прес відпадає необхідність встановлення гідробака та трубопроводів. Схема гладильного преса на базі гідроштовхача показана на рис.1.

Отже, попередня оцінка показала перспективність запропонованого напрямку, але для кінцевої відповіді необхідно провести цикл експериментально-аналітичних досліджень пресового гладильного обладнання з автономним приводом на базі гідроштовхачів.

В основу експериментальних досліджень покладено дослідження часу підйому та опускання штока гідроштовхача під різними навантаженнями, а саме $150, 200, 250 \text{ Н}$.

Фото стенду для експериментальних досліджень приводів пресового обладнання на базі



Рис. 2. Експериментальний стенд для дослідження приводів пресового обладнання на базі гідроштовхачів: 1 – гідроштовхач, 2 – датчик переміщення; 3 – тензодатчик; 4 – блок гальванічної розв'язки та підсилювач; 5 – аналого-цифровий перетворювач б-ЕОМ (гідроштовхачів) представлено на рис. 2.

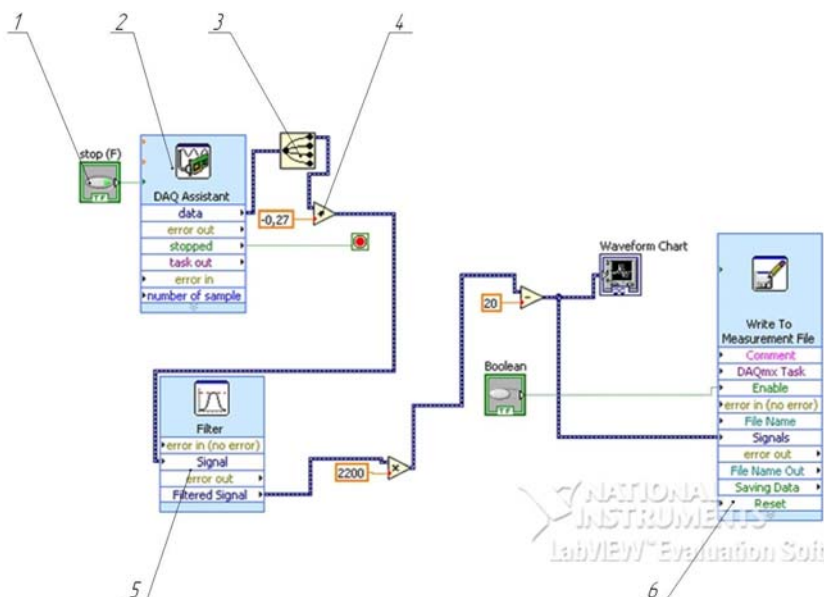


Рис. 3. Схема стенду в програмному середовищі LabVIEW: 1 – вимикач; 2 – аналого-цифровий перетворювач; 3 – розвітлювач; 4 – таруючі коефіцієнти; 5– фільтр; 6 – блок запису до файлів

Гідроштовхач 1 кріпиться на опорі. В якості датчика переміщення застосовано конічну балочку, яка в процесі руху штока гідроштовхача деформує пружний елемент, на який наклеєний тензодатчик 3. Для підсилення сигналу застосовано блок гальванічної розв'язки та підсилювач 4. Для оцифровки сигналу з метою подальшої обробки даних на ЕОМ застосовано аналого-цифровий перетворювач 5.

Сигнали від датчика 3 через підсилювач LM358N та аналого-цифровий перетворювач АЦП USB-1009 подаються до електронно-обчислювальної машини ЕОМ, де обробляються за допомогою програмного середовища LabVIEW.

Графічна оболонка середовища LabVIEW показує як змінюються переміщення в часі.

При проведенні дослідження характеристик гідроштовхача проведено дослідження за допомогою програмного середовища LabVIEW (рис. 3).

На рис. 4 показано результати експериментальних досліджень, оброблених в програмному середовищі LabVIEW

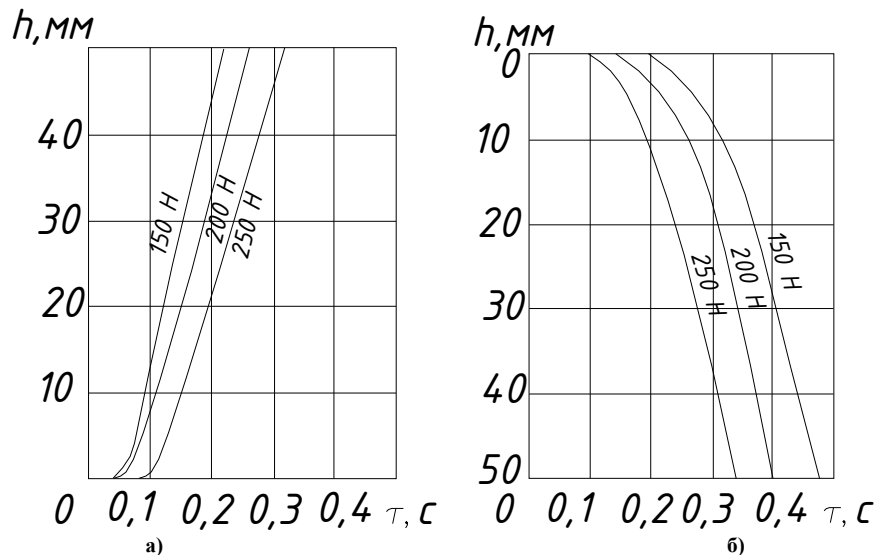


Рис. 4. Експериментальні дослідження часу підйому(а) та опускання (б) штока гідроштовхача із різними навантаженнями

Висновки

Встановлено перспективність застосування гідроштовхачів в якості приводу пресового обладнання легкої промисловості. Розроблено схему гладильного преса із застосуванням гідроштовхачів. Розроблено експериментальну установку для дослідження часу підйому та опускання штока під різними навантаженнями. Розроблено схему стенду у програмному середовищі LabVIEW. Таким чином, на основі проведеного циклу експериментальних досліджень, можна зробити висновок, що гідроштовхач має хороші динамічні характеристики і може бути застосований у якості приводу пресового обладнання легкої промисловості для виконання операцій, що не потребують великих технологічних зусиль, таких як вставка блоків, люверсів, пробивання отворів.

Література

1. Гусельников Э.М. Электрогидравлические толкатели / Гусельников Э.М., Ротт В.Ф. – М. : Энергия, 1968. – 111 с.
2. Александров М.П. Тормоза подъемно-транспортных машин / М.П. Александров. – М. : Машиностроение, 1976. – 384 с.
3. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины / М.П. Александров. – М. : Высшая школа, 1985. – 520 с.

References

1. Guselnikov E.M., Rott V.F. Elektrogidravlicheskie tolkateli. M.: Energiya, 1968. 111 s.
2. Aleksandrov M.P. Tormoza podemno-transportnyh mashin. M.: Mashinostroenie, 1976. 384 s.
3. Aleksandrov M. P. Podemno-transportnye mashiny. M.: Vysshaya shkola, 1985. 520 s.

Рецензія/Peer review : 14.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 22.9.2018 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Кармаліта А.К.

С.М. БОЙКО, М.В. КІРЮХІНА
Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету
С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет
А.В. НЕКРАСОВ, А.Ю. ДМИТРЕНКО
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ПЕРЕДУМОВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ В МЕЖАХ БЕРЕГОВИХ ЗОН ВОДОЙМ УКРАЇНИ

Дослідження, проведене у статті, показало, що особливо великі водоймища мають позитивний вплив на швидкість та стабільність вітру. Аналіз можливості впровадження вітроенергетичних станцій та комплексів на узбережжі водойм в цілому та в умовах залізрудного підприємства ВАТ «Полтавський ГЗК» показав позитивний вплив водойм, залежно від їх об'єму та віддаленості, на енергетичні показники вітроенергетичних станцій. Запропоновано структуру системи електропостачання насосної станції від вітроенергетичного комплексу, що також може бути використана в ході впровадження вітроенергетичних станцій в умовах підприємства ВАТ «Полтавський ГЗК». Україна має потужні ресурси вітрової енергії: річний технічний вітроенергетичний потенціал дорівнює 30 млрд кВт·год. Експлуатація тихохідних багатолопатевих вітроустановок з підвищеним обертаючим моментом є ефективною практично на всій території України [1]. Між тим, в Україні налічується близько 30 тисяч водосховищ, ставків, великих каналів, з поміж яких 10 великих водоводів у водозабірних басейнах річок. У зв'язку з цим в країні створено комплекс водозахисних дамб загальною протяжністю 3,8 тис. км, 1,2 тис. км берегових укріплень [2]. В ряді попередніх досліджень автори обґрунтовують позитивний ефект водойм на енергетичні показники вітру, а саме збільшення швидкості та стабільності вітру у береговій зоні водойм, і чим більша водойма тим більший ефект. Таким чином ці об'єкти, а це в масштабах України сотні гектарів, за всіма своїми параметрами можуть і повинні стати полігоном для розміщення комплексів ВЕС, які по суті повинні стати міні- або мікроелектростанціями в структурі систем електропостачання підприємств України, у тому числі залізрудних [3].

Ключові слова: ресурси вітрової енергії, вітроенергетичні станції, узбережжя водойм, тихохідні багатолопатеві вітроустановки.

S.M. BOIKO, M.V. KIRIUKHINA
Kremenchuk Flight College of the National Aviation University
S.YA. VYSHNEVSKYI
Vinnytsia National Technical University
A.V. NEKRASOV, A.YU. DMYTRENKO
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

prerequisites OF THE IMPLEMENTATION OF WIND POWER STATIONS FOR ELECTRICITY SUPPLY OF ENTERPRISES WITHIN COASTAL ZONES OF UKRAINIAN WATERS

The study, presented in this article, showed that especially large reservoirs have a positive effect on the speed and stability of the wind. The analysis of the possibility of the introduction of wind power stations and complexes on the coast of the reservoirs in general and in the conditions of the iron ore company OJSC "Poltava ore mining and processing plant" has shown a positive influence of reservoirs, depending on their volume and distance, on the energy indexes of wind power stations. The authors have proposed the structure of the electricity supply system of the pump station from the wind power complex, which can also be used in the course of the implementation of wind power stations in the conditions of the enterprise OJSC "Poltava ore mining and processing plant". Ukraine has powerful wind energy resources: the annual technical wind energy potential is 30 billion kW·h. Operation of slow-moving multi-vane wind turbines with an increased torque is effective practically all around Ukraine [1]. Meanwhile, in Ukraine there are about 30 thousand water reservoirs, ponds, large canals, 10 of which are large water conduits in the water catchment areas of the rivers. In this regard, a complex of water protection dams with a total length of 3.8 thousand km and 1.2 thousand km of coastal fortifications were created in the country [2]. In some previous researches the authors substantiate the positive effect of water reservoirs on wind energy indexes, such as increasing of the speed and stability of wind in the coastal zone of reservoirs; the larger the reservoir is the greater the effect is. Thus, these objects (that is hundreds of hectares on the scale of Ukraine) according to all their parameters can and should become a testing ground for the installation of wind energy complexes, which in essence should become mini- or micro-power plants in the structure of the power supply systems of Ukrainian enterprises, including iron ore enterprises [3].

Key words: wind power resources, wind power stations, the coast of the water reservoirs, slow-moving multi-vane wind turbines.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз можливості впровадження вітроенергетичних станцій та комплексів на узбережжі водойм в цілому та в умовах підприємств, що розташовані у зазначеній зоні, у тому числі залізрудних.

Матеріал і результати досліджень

Як відомо, переважна більшість орографічних утворень в Україні (Волинська, Подільська, Придніпровська та Донецька височини, Придніпровська низовина й Українські Карпати) орієнтовані з північного заходу на південний схід відповідно до напрямку основних геоструктурних елементів. Середня швидкість вітру, близько 4 м/с, спостерігається в центральних частинах лісостепової і степової зон,

Чернігівському Поліссі, північній частині Полтавсько-Роменської лісостепової області Придніпровської низовини і підобласті передгір'я Кримських гір. Весною на більшій частині території України переважають середні швидкості вітру (4–5 м/с), влітку – 3–4 м/с. Восени майже на всій лісостеповій зоні спостерігаються швидкості вітру в межах 3–4 м/с. Степова зона характеризується швидкостями вітру 4–5 м/с.

Окрім вище зазначеного, на місцеві особливості клімату України впливають також і водойми, що займають близько 0,3 % площі території країни. Вплив водосховищ, відстійників, ставків і боліт на режим метеорологічних величин різний. Найбільше водосховища впливають на вітер: його швидкість над акваторією та узбережжям підвищується на кілька десятків відсотків [4].

Деяке зростання швидкостей вітру спостерігається повсюдно на прибережному схилі, що спричинене насамперед близькістю водосховища. Швидкість вітру над акваторією водосховища майже не змінюється (15–20%) в холодний період, а в теплий період зростає на 50–100%. Восени на навітряному березі водосховища спостерігається збільшення в 2–3 рази повторюваності сильних вітрів (понад 15 м/с) в порівнянні з вихідними вітровими умовами. В сторону суші бризи можуть проникати на відстань 3 км і більше, захоплюючи по висоті зону в 100–300 м. За наявності вітру із суші швидкістю понад 4 м/с, бриз зазвичай не утворюється [4].

Тому створення гідровулів головним чином викликає зміни у мікрокліматі прилеглих територій, причому ступінь їх впливу зменшується зі зростанням відстані від зрізу води. Причини таких змін, у першу чергу, пов'язані з підвищенням сумарної радіації та зміною радіаційного балансу водойми, а також більшою величиною теплоємності водної маси у порівнянні з сушею. На узбережжі великих водоймищ, наприклад водосховищ, виникають ознаки «приморського клімату»: підвищується вологість повітря, зменшується добова амплітуда температур, виникає бризова циркуляція. Під час створення водосховищ змінюється добовий хід швидкості вітру. Над акваторією максимальна швидкість вітру реєструється в нічні години, а мінімальна – у денні. На узбережжі цей розподіл інший: максимум – у денні години, а мінімум – у ранкові [4].

Енергетичні установки зазвичай використовують вітер у приземному шарі на висоті до 50...70 м, рідше – до 100...150 м від поверхні Землі, тому найбільший інтерес представляють характеристики руху повітряних потоків саме в цьому шарі. Найважливішою характеристикою, що визначає енергетичну цінність вітру, є його швидкість. В силу ряду метеорологічних чинників (збурення атмосфери, зміни сонячної активності, кількості теплової енергії, що поступає на Землю, та інших причин), а також внаслідок впливу рельєфних умов, безперервна тривалість вітру в даній місцевості, його швидкість і напрямок змінюються за випадковим законом. Тому потужність, яку може виробляти вітроустановка в різні періоди часу, вдається передбачати з дуже малою ймовірністю. У той же час сумарне вироблення агрегату, особливо за тривалий проміжок часу, можна розрахувати з високим рівнем достовірності, так як середня швидкість вітру і частота розподілу швидкостей протягом року або сезону змінюються незначно.

Як і будь-яке рухоме тіло, вітер володіє певним запасом кінетичної енергії, яка може бути перетворена в механічну роботу або електричну енергію за допомогою спеціальних пристроїв і установок, що одержали назву вітряних. Швидкість вітру є найважливішою характеристикою технічних властивостей вітру. Кінетична енергія вітрового потоку E , як всякого тіла, що рухається зі швидкістю V і має масу γ , дорівнює [5]:

$$E_{\text{кін}} = \frac{\gamma v^2}{2}. \quad (1)$$

У свою чергу, маса повітря в перерізі перед вітроагрегатом є масовою витратою повітря, що могло б пройти через площу S вітроколеса за одиницю часу, маючи щільність ρ :

$$m = \rho v A, \quad (2)$$

де $\rho = \frac{\gamma}{g}$ – масова щільність повітря; γ – питома вага повітря; g – прискорення сили тяжіння; A – площа, через яку протікає вітровий потік; v – швидкість вітру.

Площа обмахування вітроколеса – це геометрична проекція площі вітроколеса на площину, перпендикулярну вектору швидкості вітру. У разі перпендикулярності вектора швидкості вітру до площі обмахування S , її величина визначається за формулами [6]:

– для горизонтально-осьового вітродвигуна:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}; \quad (3)$$

– для вертикально-осьового вітродвигуна:

$$A = D \cdot H. \quad (4)$$

Розглянемо трубку потоку повітря радіусом R зі швидкістю потоку V і визначимо масу повітря, що проходить через перетин трубки в одиницю часу:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot dl = \rho \cdot A \cdot v \cdot \Delta t = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v \cdot \Delta t, \quad (5)$$

де ρ – питома щільність (вага) повітря, кг/м³; V – об'єм, який займає повітря, м³; A та R – відповідно площа і радіус трубки потоку повітря, м², м; dl – елемент довжини потоку, який долається за час Δt .

Отже, отримаємо рівняння для визначення кінетичної енергії повітряного потоку (вітру) та його потужності [6]:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot t. \quad (6)$$

Таким чином, з формул 1–6 видно, що найбільший вплив на енергетичні показники вітру має швидкість вітру, а на другому місці – щільність повітря.

Сучасні вітрогенератори перетворюють в механічну енергію не більше 45–48% кінетичної енергії вітрового потоку. Тому теоретична максимальна потужність вітроустановки не перевищує:

$$W_{\text{т}} = \frac{\xi \cdot \rho \cdot v^3 \cdot F}{2} \quad (7)$$

На підставі даних спостереження швидкостей вітру за висотою деякими дослідниками виведено узагальнюючі формули для визначення швидкості вітру за висотою. З них найбільш проста залежність для висоти від 5 м і вище має наступне вираження:

$$V_1 = V_0 \cdot \left(\frac{H_1}{H_0} \right)^k, \quad (8)$$

де V_1 – швидкість вітру на заданій висоті; V_0 – швидкість вітру на відомій висоті (для метеостанцій прийнято 10 м); H_1 – задана висота; H_0 – висота виміру; k – емпіричний показник жорсткості провітрюваної поверхні.

Із наведеної вище формули всі показники відомі, крім ступеня k . Значення k в багатьох роботах приймається $k=0,143$. В нормативних документах рекомендують $k=0,2$. В США для різних місць представлені значення від 0,2 до 0,26. Під час вимірювань на різних висотах значення k досягає 0,34. В окремих працях для України використовується $k=0,167$. Тим не менш підбір значень потребує обережності [7].

Так як місцем для встановлення вітроенергетичної станції розглядається відвал, що являє собою повністю відкритий ландшафт, то степеневий показник жорсткості приймаємо 0,2.

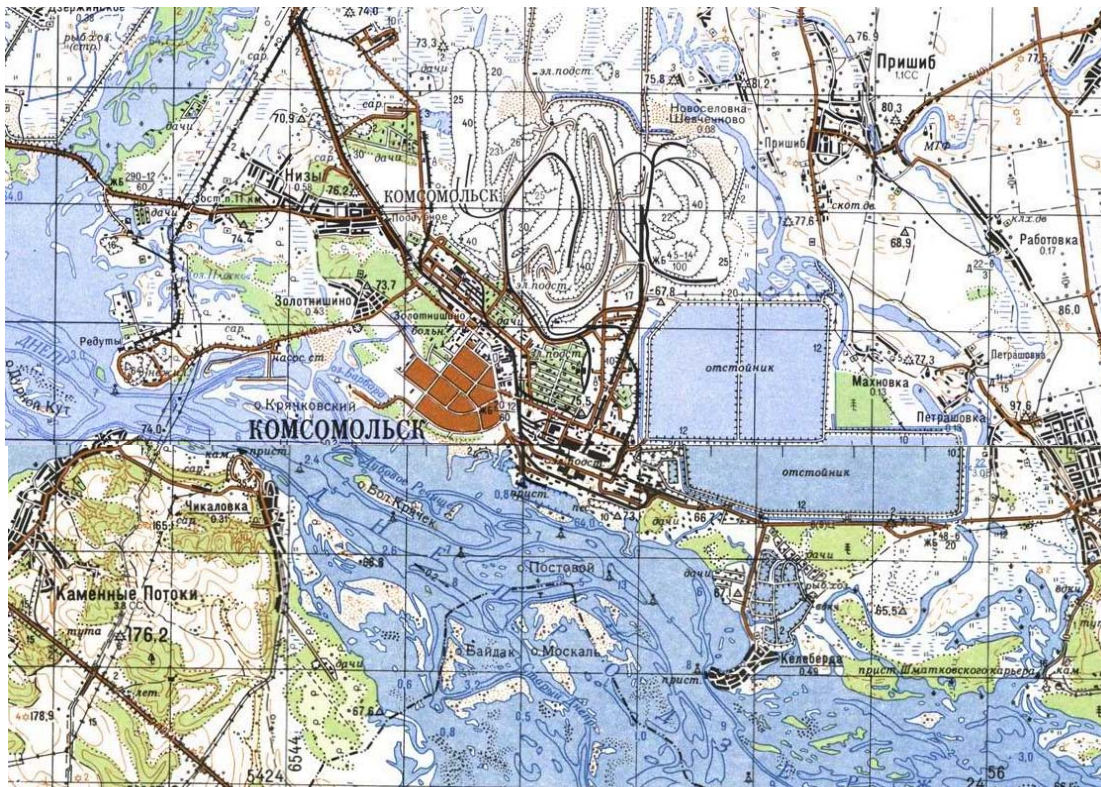


Рис. 1. Розташування залізрудного підприємства ВАТ «Полтавський ГЗК» відносно навколишніх природних та штучних водойм

Таким чином, враховуючи перераховану проблематику організації функціонування насосних та компресорних станцій гідрозахисних споруд, у тому числі систем їх електропостачання та факт розташування на узбережжі Дніпродзержинського водосховища одного з потужних залізрудних підприємств України ВАТ «Полтавський ГЗК» (рис. 1), що має у своєму складі, за технологією, гідротехнічні споруди (відстійники), було запропоновано розташування вітроенергетичних комплексів (ВЕК) та вітроенергетичних станцій (ВЕС) в межах берегової зони водойм. Встановлення ВЕК та ВЕС біля

водойм, в перше чергу, сприятиме покращенню їх енергетичних показників та збільшенню надійності систем електропостачання насосних та компресорних станцій гідрозахисних споруд та насосних станцій ВАТ «Полтавський ГЗК».

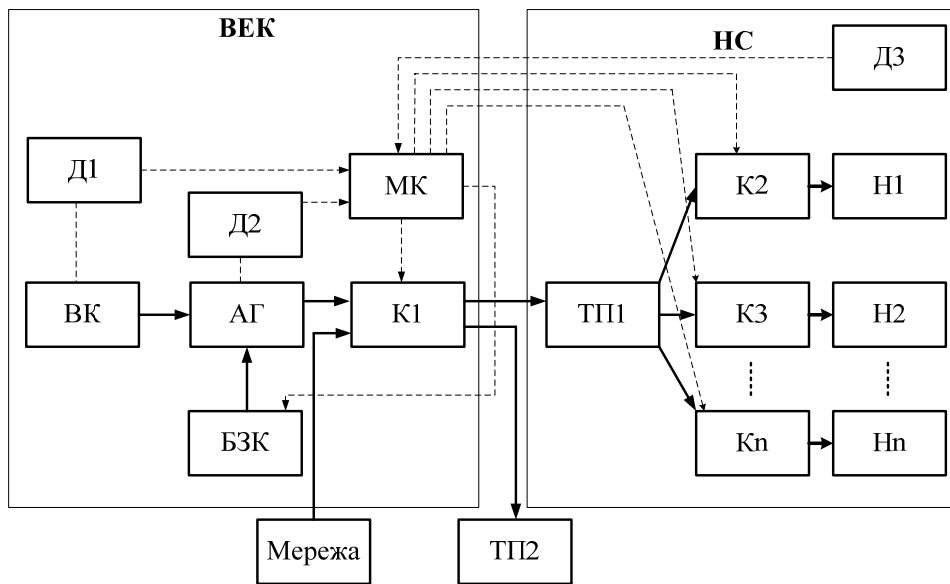


Рис. 2. Структура системи електропостачання насосної станції від вітроенергетичного комплексу:
ВЕК – вітроенергетичний комплекс; **НС** – насосна станція; **ВК** – вітрове колесо; **АГ** – асинхронний генератор;
МК – мікроконтролер; **БЗК** – блок збуджуючих конденсаторів; **Н1, Н2, Нn** – насоси;
ТП1, ТП2 – трансформаторна підстанція; **К1, К2, К3, Кn** – комутатор; **Д1** – датчик частоти обертів **ВК**;
Д2 – датчик напруги та частоти напруги згенерованої **АГ**; **Д3** – датчик рівня води

В основу запропонованого схемного рішення (рис. 2) поставлена задача підвищення ефективності роботи системи електропостачання з використанням додаткового джерела енергії на базі вітроустановки, що дозволить підвищити надійність та безперебійність електропостачання підключених до нього споживачів (у тому числі насосних станцій). Таким чином, при впровадженні запропонованого схемного рішення система має можливість корегувати роботу вітроустановки як додаткового джерела живлення на одну спільну систему електропостачання насосної станції кар'єру, в результаті аварійної ситуації насосна станція живиться від магістральної електромережі, система за необхідності може підключати та відключати певну кількість насосів, з метою регулювання навантаження та ефективної роботи насосної станції, що зумовлює підвищення надійності електропостачання насосної станції і підвищує ефективність роботи вітроенергетичного комплексу [8–11].

Висновки. 1. Аналіз можливості впровадження вітроенергетичних станцій та комплексів на узбережжі водойм в цілому та в умовах залізничного підприємства ВАТ «Полтавський ГЗК» показав позитивний вплив водойм, залежно від їх об'єму та віддаленості, на енергетичні показники вітроенергетичних станцій.

2. Запропоновано структуру системи електропостачання насосної станції від вітроенергетичного комплексу, що також може бути використана в ході впровадження вітроенергетичних станцій в умовах підприємства ВАТ «Полтавський ГЗК».

Література

1. Клімат України / [за ред. В.М. Лівійського, В.А.Дячука, В.М. Бабіченко]. – К. : Вид-во Раєвського, 2003. – С. 133.
2. Загальна гідрологія : підр. / [Левківський С.С., Хільчевський В.К., Оболюцький О.Т. та ін.] ; за ред. С.М. Лисогора. – К. : Фітосоціоцентр, 2000. – 264 с.
3. Аерологія гірничих підприємств / [А.О. Гурін, П.В. Бересневич, А.А. Немченко, І.Б. Ошманський]. – Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2007. – 262 с. – ISBN 978-966-350-369-1.
4. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. [Електронний ресурс] // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua>.
5. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року / [Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В. та ін.]. – К. : Вид. Ін-ту електродинаміки НАН України, 2011. – 275 с.
6. Дмитренко Л.В. Вітроенергетичні ресурси в Україні / Л.В. Дмитренко, С.Л. Барандіч // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2007. – Вип. 256. – С. 166–173.
7. Дослідження вітрового режиму України, виявлення основних кліматоутворюючих факторів глобального і регіонального масштабів, які обумовлюють сучасні особливості вітрового режиму України: Аналіз даних довгострокових спостережень вітропотенціалу на гідрометеорологічних станціях України. Том

1 : рвіт з НДР / МНТЦ вітроенергетики НАНУ. – К., 2001. – 136 с.

8. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К. : ТОВ «ВіолаПрінт», 2008. – 55 с.

9. Энергоэффективность железорудных производств. Оценка, практика повышения : монография / [Синчук О.Н., Синчук И.О., Гузов Э.С. и др.]. – Кременчуг : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 346 с.

10. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения / Праховник А.В. – К. : «Освіта України», 2007. – 464 с.

11. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник / С.О. Кудря. – К. : Національний технічний університет України («КПІ»), 2011. – 494 с.

References

1. Klimat Ukrainy / [za red. V.M. Liviiskoho, V.A. Diachuka, V.M. Babichenko]. – K. : Vyd-vo Raievskoho, 2003. – S. 133.
2. Zahalna hidrolohiia : pidr. / [Levkivskiy S.S., Khilchevskiy V.K., Obolotskiy O.T. ta in.] ; za red. S.M. Lysohora. – K. : Fitosotsiotsentr, 2000. – 264 s.
3. Aerolohiia hirnychkykh pidpriemstv / [A.O. Hurin, P.V. Beresnevych, A.A. Nemchenko, I.B. Oshmanskiy]. – Kryvyi Rih : Vydavnychiy tsentr KNU, 2007. – 262 s. – ISBN 978-966-350-369-1.
4. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 r. [Elektronnyi resurs] // Sait Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy. – Rezhym dostupu : <http://mpe.kmu.gov.ua>.
5. Osnovni parametry enerhozabezpechennia natsionalnoi ekonomiky na period do 2020 roku / [Stohnii B.S., Kyrylenko O.V., Prakhovnyk A.V. ta in.]. – K. : Vyd. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2011. – 275 s.
6. Dmytrenko L.V. Vitroenerhetychni resursy v Ukraini / L.V. Dmytrenko, S.L. Barandich // Nauk. pr. UkrNDHMI. – 2007. – Vyp. 256. – S. 166–173.
7. Doslidzhennia vitrovoho rezhymu Ukrainy, vyivlennia osnovnykh klimatoutvoriuiuchykh faktoriv hlobalnoho i rehionalnoho mashtabiv, yaki obumovliuiut suchasni osoblyvosti vitrovoho rezhymu Ukrainy: Analiz danykh dovhostrokovykh sposterezen vitropotentsialu na hidrometeorolohichnykh stantsiiakh Ukrainy. Tom 1 : pvit z NDR / MNTTs vitroenerhetyky NANU. – K., 2001. – 136 s.
8. Atlas energetichnogo potentsialu vidnovlyuvanykh dжерел energii Ukrainy. – K. : TOV «ViolaPrint», 2008. – 55 s.
9. Energoeffektivnost jelezorudnykh proizvodstv. Otsenka, praktika povyisheniya : monografiya / [Sinchuk O.N., Sinchuk I.O., Guзов E.S. i dr.]. – Kremenchug : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 346 s.
10. Prahovnik A.V. Malaya energetika: raspredelennaya generatsiya v sistemah energosnabjeniya / Prahovnik A.V. – K. : «Osvita Ukrainy», 2007. – 464 s.
11. Kudria S.O. Netradyciini ta vidnovliuvani dzherela enerhii : pidruchnyk / S.O. Kudria. – K. : Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy («KPI»), 2011. – 494 s.

Рецензія/Peer review : 19.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сінчук О.М.

УДК 62-322+62-366.1+62-522.2+ 687.05

О.О. КОРОТИЧ, В.С. НЕЙМАК, С.І. ПУНДИК, П.С. МАЙДАН

Хмельницький національний університет

ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ПЛІСИРУВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДУЛЯ FLOWORKS

На основі аналізу конструкції плісирувальної машини ножового-валкового типу, три виконавчих механізми якої отримують рух від електропривода через ланцюги передаточних механізмів, авторами розроблено гідравлічну систему розподілення руху на робочі механізми плісирувальної машини, що може виконувати, як розподільну, так і керуючу функцію та може замінити керовані автоматичні пристрої. В цілому плісирувальна машина має спрощену конструкцію і підвищену надійність. Проте на даний момент не існує можливості для підключення його в мережу високого тиску, тому для перевірки працездатності запропонованого гідравлічного обладнання проведено цикл експериментальних досліджень, застосувавши модуль FloWorks для системи параметричного моделювання SolidWorks. Отримано результати розподілу рідини у розподільнику для окремих порожнин, що приводять у рух робочі органи плісирувальної машини, зокрема механізму подачі складкоутворюючих елементів (ножів), механізму захоплення матеріалу та механізму для подачі і термофіксації матеріалу.

Ключові слова: гідравлічний розподільник, циклічна діаграма роботи машини, гідропривід виконавчих механізмів, числові дослідження

O.O. KOROTYCH, V.S. NEYMAK, S.I. PUNDYK, P.S. MAJDAN

Khmelnitskyi National University

NUMERICAL RESEARCH OF HYDRAULIC DISTRIBUTOR OF THE MACHINE FOR PLEATING WITH THE USE OF THE SOFTWARE ENVIRONMENT FLOWORKS

Developed a new original hydraulic distributor design which provides the supply fluid according to a cycle diagram work on three major hydrocylinder for the working mechanisms of the machine for pleating. On the basis of the analysis of the structure of a knife-roller pleating machine, the three actuators of which are driven by the electric drive through the chain of gear mechanisms, the authors developed a hydraulic system for distributing motion on the working mechanisms of the plasticizer. Hydraulic and hydro-kinematic schemes of the machine, working drawings of parts and assembly drawings of the hydraulic distributor are developed. The new original design of the hydraulic distributor ensures the supply of the working fluid in accordance with the cyclic diagram of the work on three hydraulic cylinders of the main working mechanisms of the plasticizer. The developed hydrodistributor can perform both distributive and control functions that can replace the controlled automatic devices. In general, the plasticizer has a simplified design and increased reliability. However, at the moment there is no possibility to connect it to a high-pressure network, therefore, for checking the efficiency of the proposed hydraulic equipment, a cycle of experimental studies was conducted using the FloWorks module for the SolidWorks parametric modelling system. The results of distribution of the liquid in the distributor for separate cavities, which result in the movement of the working bodies of the pleating machine, in particular the mechanism of feeding the fold-forming elements (knives), the mechanism of material capture and the mechanism for feeding and thermofixing of the material, are obtained.

Keywords: the hydraulic distributor, cycle diagram work, hydro-drive executive mechanisms, numerical research.

Однією з важливих задач під час проектування і конструюванні машин є оптимальність вибору кількості деталей і вузлів, їх ваги, металоємкості, виду привода, регулюючих і керуючих пристроїв, в результаті чого покращуються техніко-економічні показники машини.

Проведено огляд та аналіз технології, обладнання гідравлічних приводів для технологічних машин, яке широко використовується в легкій промисловості на швейному, взуттєвому виробництвах і побутовому обслуговуванні. Розглянуто класифікацію гідророзподільників, призначення, їх характеристики та будову, визначено переваги, недоліки, можливості їх регулювання.

На основі аналізу конструкції плісирувальної машини [1] ножового-валкового типу, три виконавчих механізми якої отримують рух від електропривода через ланцюги передаточних механізмів, авторами розроблено гідравлічну систему розподілення руху на робочі механізми плісирувальної машини. Гідравлічний привод виконавчих механізмів значно спрощує конструкцію, зменшує металоємкість, шум при роботі і збільшує надійність машини за рахунок заміни ланцюгів передаточних механізмів, що складаються із множини пар тертя і деталей, на 3 гідроциліндри, які безпосередньо з'єднані з трьома виконавчими механізмами і отримують рух від одного розподільного пристрою згідно циклограми роботи плісирувальної машини.

Розроблений гідророзподільник виконаний у вигляді розподільного валика, встановленого в корпусі з можливістю обертання і що має кільцеві канавки, розташовані співвісно з отворами корпусу, і сегментні канавки, розташовані співвісно з декількома отворами, сполученими з гідроциліндрами. Причому розміщення цих отворів в діаметральному перетині, кутів розміри і розташування сегментних канавок розподільного валика відповідають фазам дії виконавчих механізмів згідно циклічної діаграми машини.

Розроблені гідравлічна і гідрокінематична схеми машини, робочі креслення деталей і складальні креслення гідророзподільника. Виконано розрахунки елементів гідропривода [2, 3]. Проведено дослідження комплексного розподільного пристрою, що підтвердили його працездатність для приводу гідродвигунів робочих механізмів плісирувальної машини.

Нова оригінальна конструкція гідравлічного розподільника забезпечує подачу робочої рідини згідно циклічної діаграми роботи на три гідроциліндра основних робочих механізмів плісирувальної машини. Розроблений гідророзподільник може виконувати, як розподільну, так і керуючу функцію що може замінити керовані

автоматичні пристрої. В цілому плісирувальна машина має спрощену конструкцію і підвищену надійність.

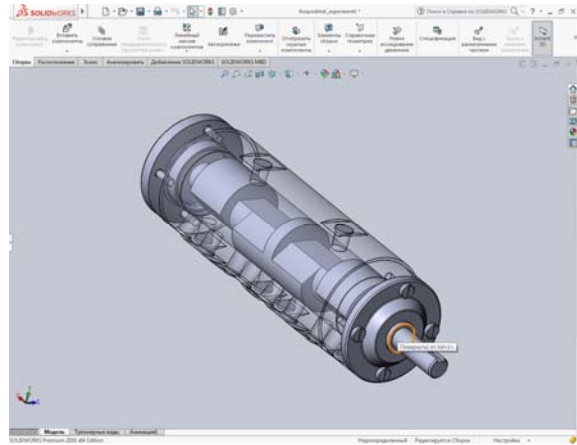
З метою проведення експериментальних досліджень розробленого гідравлічного обладнання для плісирувальної машини було виготовлено експериментальний зразок гідророзподільника (рис. 1 а).

Проте на даний момент не існує можливості для підключення його в мережу високого тиску, тому для перевірки працездатності запропонованого гідравлічного обладнання вирішено провести цикл експериментальних досліджень, застосувавши модуль FloWorks для системи параметричного моделювання SolidWorks.

Спочатку була розроблена модель гідравлічного розподільника для плісирувальної машини в системі SolidWorks, що показана на рис. 1 б.



а)



б)

Рис. 1. Гідророзподільник для плісирувальної машини (а), та його модель, розроблена в системі SolidWorks (б)

При роботі в модулі FloWorks визначається робоча зона, де проводяться дослідження, а в усі отвори встановлюються заглушки із параметрами потоку.

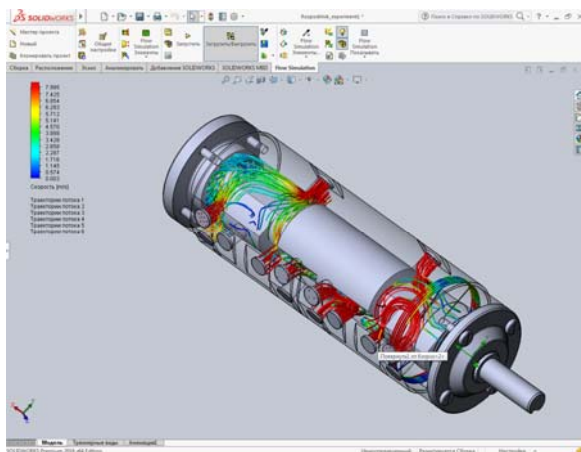
Вказується область тиску відповідно до положень розподільного валика відносно корпусу.

Умови експерименту наступні:

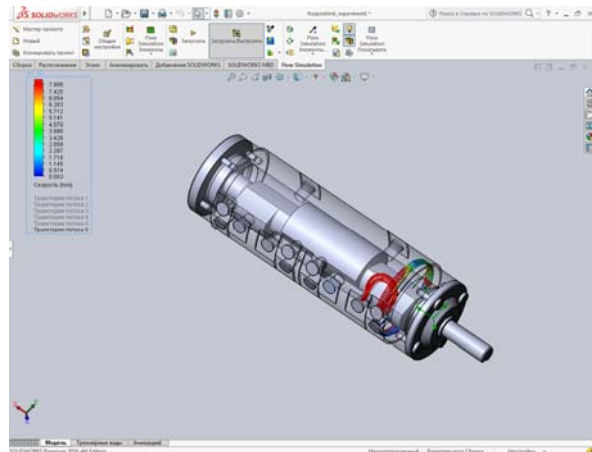
Вхідний тиск	5,3 МПа
Втрати у гідроприводі	10%
Швидкість обертання розподільного валика	120 об/хв

Граничні умови задані, згідно з попередньо проведеними розрахунками, з наступними параметрами: вхідний тиск 5,3 МПа, вихідний 4,8 МПа.

Провівши числові дослідження, відповідно до початкових умов, отримано наступні результати: загальний розподіл рідини у розподільнику та для подачі рідини у механізм подачі складкоутворюючих елементів (рис. 2 а, б).



а)



б)

Рис. 2. Загальний розподіл рідини у розподільнику (а) та для подачі рідини у механізм подачі складкоутворюючих елементів (ножів) –(б)

Також отримано результати розподілу рідини у розподільнику для окремих порожнин, що приводять у рух робочі органи плісирувальної машини, зокрема механізму подачі складкоутворюювальних елементів (ножів) (рис. 2 б), механізму захоплення матеріалу (рис. 3 а) та механізму для подачі і термофіксації матеріалу (рис. 3 б).

Проведено числові дослідження швидкості потоків рідини у напірній порожнині (рис. 4 а) та у зливній порожнині (рис. 4 б) гідророзподільника залежно від геометричних параметрів.

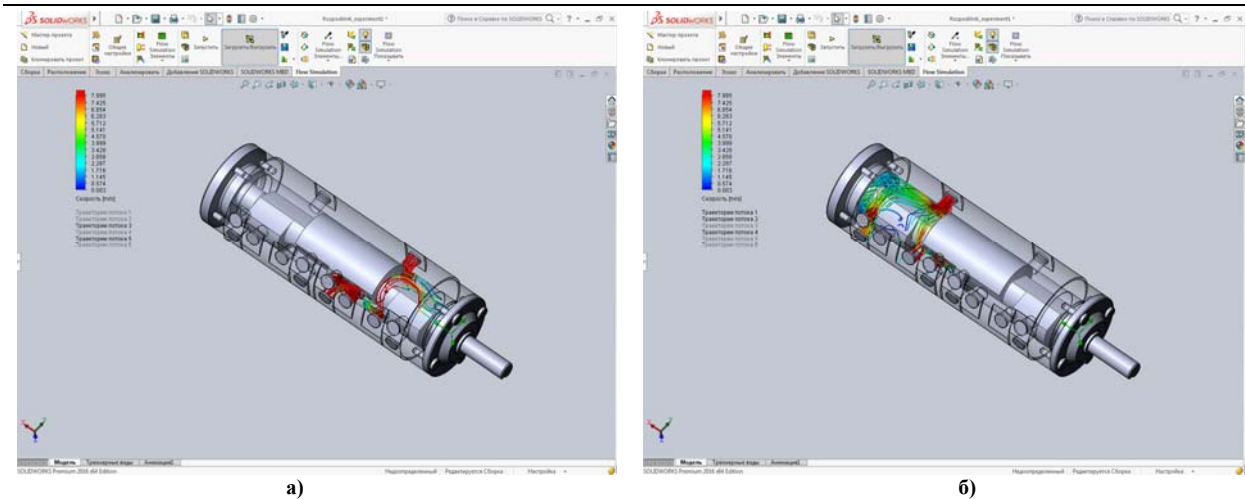


Рис. 3. Розподіл рідини у розподільнику для подачі рідини у механізм захоплення матеріалу(а) та для подачі рідини у механізм для подачі і термофіксації матеріалу

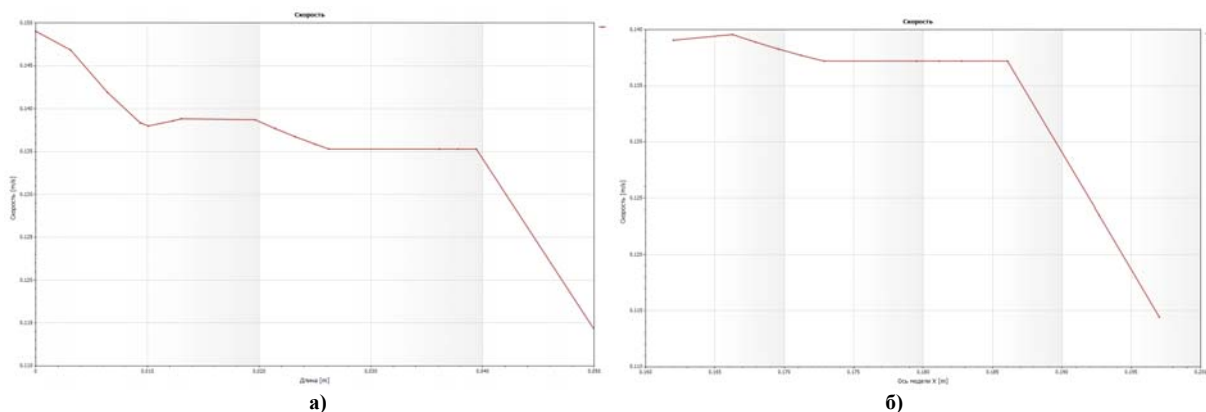


Рис. 4. Швидкість потоку у напірній порожнині (а) та у зливній порожнині (б) гідророзподільника

Висновки

Розроблено нову оригінальну конструкцію гідравлічного розподільника, який забезпечує подачу робочої рідини одночасно на три гідроциліндра основних робочих механізмів плісирувальної машини які працюють за циклічною діаграмою (циклограмою). Тобто розроблений гідророзподільник механічної дії виконує як розподільну так і керуючу функцію що може замінити керовані автоматичні пристрої.

Розроблено експериментальний зразок та комп'ютерну модель гідравлічного розподільника для плісирувальної машини, проведено цикл числових досліджень із застосуванням модуля FloWorks у системі параметричного моделювання SolidWorks з визначенням функціональних характеристик робочої рідини у порожнинах розподільника та підтверджена працездатність експериментального зразка гідророзподільника.

Результати експериментальних досліджень планується використати в подальшому для розробки повноцінної конструкції плісирувальної машини із розробленим гідравлічним розподільником.

Література

1. А.с. СССР 1498852, МКВ D 06 J 1/00. Плиссировочная машина / Б.А. Зайцев, О.О. Коротич. – № 427577/31-12; заявл. 14.08.87; опубл. 07.08.89; Бюл. № 29.
2. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев. – Машиностроение, 1982.
3. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: учеб. для вузов / Попов Д.Н. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 320 с., ил.

References

1. A.S. SSSR 1498852, MKV D 06 J 1/00. Plissirovochnaya mashina. B.A. Zajcev, O.O. Korotich - № 427577/31-12; Zayavl. 14.08.87; Opubl. 07.08.89; Byul. № 29.
2. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: Uchebnik dlya mashinostroitel'nyh vuzov / T.M. Bashta, S.S. Rudnev, Mashinostroenie, 1982.
3. Popov D.N. Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov: Ucheb. dlya vuzov. - M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Baumana, 2001. 320 s., il.

Рецензія/Peer review : 10.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Кармаліта А.К.

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ЦИКЛОНА ПИЛОСОСА

Стаття присвячена вдосконаленню побутового пилососу шляхом введення в конструкцію циклонного пристрою для відділення пилу. Об'єктом дослідження є відділення пилу від повітряного потоку в пристроях вихрового типу. Метою дослідження є вивчення можливості збільшення ефективності відділення пилу від потоку повітря у побутових пилососах з циклонними пристроями. Завдання цієї роботи – визначити аналітичним способом геометричні та технологічні параметри циклонного пристрою для збору пилу, який може бути успішно використаний у побутовому пилососі з його відомими характеристиками. Була створена математична модель циклонного побутового приладу, що дозволяє визначити співвідношення геометричних та технологічних параметрів, за яких частинки пилу будуть гарантовано, 100%, відокремлені від потоку повітря. У статті також розраховані конструктивні параметри циклону для пилососа, що відповідає його технічним характеристикам. У роботі теоретично обґрунтовано вибір конструктивних і технологічних параметрів циклонних пристроїв для побутових пилососів. Проведено аналіз впливу на процес відділення пилу коливань витрат вхідного потоку, що може відбуватись в результаті використання різних насадок, заповнення циклонного пристрою сміттям, а також при регулюванні швидкості електродвигуна агрегату. З графіків, наведених у статті, можна побачити, що при коливанні продуктивності агрегату пилососа в межах $350 \times 10^{-4} \pm 150 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ критичний діаметр часток матеріалів змінюється незначно ($\pm 30\%$), отже коливання і зміни продуктивності не будуть негативно впливати на роботу очисного пристрою. Результати досліджень можуть бути використані для розробки побутових пилососів.

Ключові слова: пилосос, повітряний потік, пил, циклон, математична модель, технологічні параметри, конструкція.

V.P. MISYATS

Kyiv National University of Technologies and Design

O.G. TYMOSHCHUK, O.O. KOROTYCH, S.I. PUNDYK

Khmelnitskiy National University

THE ANALYTICAL STUDY OF THE WORK PROCESS A CYCLONE IN A VACUUM CLEANER

The article is devoted to the improvement of the household vacuum cleaner by introducing into the construction of a cyclone device for the separation of dust. The object of study is the separation of dust from the air flow in devices of vortex type. The aim of the study is to study the possibility of increasing the efficiency of separation of dust from the air flow in household vacuum cleaners with cyclone devices. The task of this work is to determine the analytical way of geometric and technological parameters of the cyclone device for dust collection, which can be successfully used in a household vacuum cleaner with its known characteristics. In this work was been created a mathematical model of a cyclone household device, which allows to determine the ratio of geometric and technological factors, at which dust particles will be guaranteed, 100% separated from the air flow. In this article also the design parameters of the cyclone for the vacuum cleaner have been calculated, which is consistent with its technical characteristics. In the work, the choice of constructive and technological parameters of cyclone devices for household vacuum cleaners is theoretically justified. The analysis of the impact on the process of separation of dust flow rate fluctuations, which can occur as a result of the use of various nozzles, filling the cyclone device with garbage, as well as when regulating the speed of the electric motor unit. From the graphs given in the article, it can be seen that when the vacuum generator unit fluctuates within $350 \times 10^{-4} \pm 150 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, the critical diameter often changes slightly ($\pm 30\%$), hence fluctuations and changes in productivity will not be adversely affect the operation of the cleaning device. The research results can be used to design household vacuum cleaners.

Key words: vacuum cleaner, air flow, dust, cyclone, mathematical model, technological parameters, construction

Вступ

Сьогодні на світовому ринку конкурують три типи побутових пилососів, які різняться системами відділення пилу від повітряного потоку:

- пилососи з класичним фільтром бар'єрного типу (тканина, папір та т.п.);
- пилососи з водяним фільтром (аквафільтри);
- пилососи з фільтрами циклонного типу.

Теоретичному дослідженню останніх присвячена дана робота.

Постановка проблеми

Завданням даної роботи є визначення аналітичним шляхом геометричних і технологічних параметрів циклонного пристрою для вловлювання пилу, який може бути успішно використаний в побутовому пилососі при відомих його характеристиках.

Об'єктом дослідження є процеси відділення пилу від повітряного потоку в пристроях вихрового типу. Предметом дослідження є циклонний пристрій для побутового пилососа. Метою дослідження є вивчення можливості підвищення ефективності відділення пилу від повітряного потоку в побутових пилососах з циклонними пристроями.

Методологічною і теоретичною основою дослідження служать основні положення теоретичної механіки та гідравліки.

Результати досліджень

На рис. 1 представлена схема руху повітряного потоку в циклонному пристрої пирососа. Забруднене пилом повітря втягується в патрубок 9 циклонного пристрою за рахунок різниці тисків зовні і в камері всмоктувального агрегату (розрідження в вихідному патрубку 1). Повітря рухається в профільованому каналі, який сформований внутрішньою поверхнею головного циліндра 6, зовнішньою поверхнею центральної труби 7 і гвинтовою перегородкою 8 між поверхнями циліндрів 6 і 7.

Завдяки формі каналу, повітряний потік рухається вгору зі швидкістю V_g і по колу з кутовою швидкістю W . Співвідношення величин V_g і W залежить від діаметрів циліндрів 6 і 7, кута нахилу

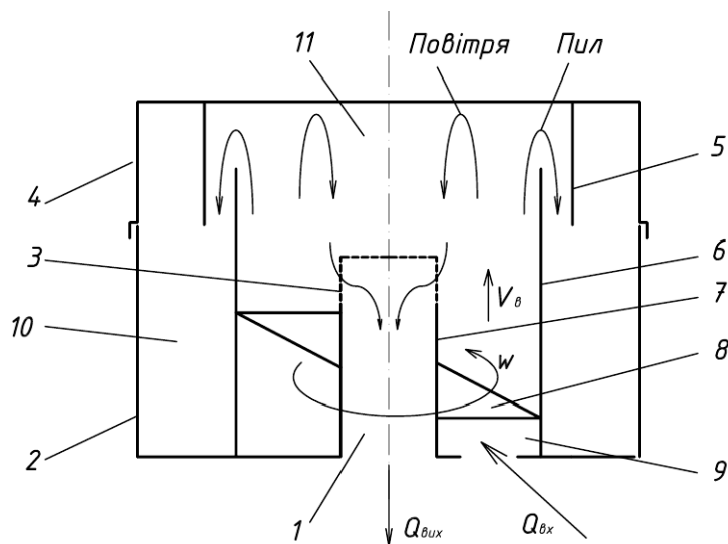


Рис. 1. Схема руху повітряного потоку в циклонному пристрої пирососа:

1 – вихідний патрубок; 2 – зовнішній корпус; 3 – решітка; 4 – кришка; 5 – екран; 6 – головний циліндр; 7 – центральна труба; 8 – гвинтова перегородка; 9 – вхідний патрубок; $Q_{вх}$ – витрати вхідного потоку

забрудненого повітря; $Q_{вих}$ – витрати вихідного потоку очищеного повітря;

W – кутова швидкість обертання повітряного потоку; V_g – лінійна швидкість вертикального переміщення повітряного потоку

результаті пил і повітря рухаються до перегородки 5 з меншою швидкістю.

При досягненні частками пилу і повітрям перегородки 5 відбувається їх удар об неї і напрямком складових лінійних швидкостей змінюється. Напрямок векторів швидкостей після удару залежить від їх напрямку до удару, але в радіальному напрямку частки і повітря по любому починають рухатись до центру обертання.

На зворотному шляху частинок пилу від перегородки 5 до центру циклону вони стикаються з зустрічним потоком і їх швидкість остаточно зменшується. В результаті дії на пил сили тяжіння вони рухаються по параболі донизу і по досягненні границі головного циліндру, вони опиняються вже нижче його верхнього зрізу. Відбувається удар частинок об зовнішню поверхню головного циліндру 6, їх енергія, а відповідно і швидкість ще зменшується, та знову змінює напрямок на протилежний. Так відбувається до тих пір, доки частинки пилу не "заспокоюються" на дні зовнішнього корпусу 2.

Оскільки тиск в порожнинах 10 і 11 рівний, то руху повітря в нижній зоні майже не буде (тільки за рахунок його залишкової кінетичної енергії) і осаджений пил не буде підніматись з dna повітряним потоком. Частинки пилу після потрапляння в циклон рухаються в каналі, який утворений внутрішньою бічною поверхнею циліндричного корпусу 6 (рис. 1) і зовнішньою поверхнею труби 7. Будемо вважати, що частинки пилу мають масу m_q і форму кулі діаметром d_q . Повітря надходить в циклон з постійними витратами $Q_{вх}$.

В каналі з гвинтоподібною перегородкою потік повітря буде мати складний рух:

- по вертикалі, зі швидкістю, що залежить від площі поперечного перетину каналу і витрати $Q_{вх}$;
- по колу відносно центру симетрії каналу, з кутовою швидкістю, що залежить від кута нахилу гвинтової лінії перегородки в каналі.

Залежності між лінійною швидкістю руху потоку догори пристрою V_g і кутовою швидкістю обертання потоку визначимо з векторної діаграми швидкостей, яка представлена на рис. 2.

Згідно з представленою на рис. 2. діаграмою, частинка має складний рух, траєкторія якого визначається миттєвими співвідношенням швидкостей V_g , $V_{кол}$ і V_p . Швидкість руху частинки пилу в радіальному напрямі обумовлена дією на неї відцентрової сили в результаті обертання.

гвинтової перегородки, продуктивності повітряного потоку і його властивостей.

В результаті кругового руху, на молекули повітря і на частинки пилу діє відцентрова сила, направлена в радіальному напрямку від центру обертання. Під дією цієї сили частинки пилу концентруються біля внутрішньої поверхні головного циліндру і їх кінетична енергія частково витрачається на тертя об цю поверхню.

По досягненні спіралеподібним потоком верхньої границі головного циліндру, він прискорюється в радіальному напрямку і частинки пилу рухаються в напрямку циліндричної перегородки 5, що знаходиться на кришці 4. При цьому можна умовно сказати, що "момент інерції" повітряного потоку збільшується в результаті збільшення його діаметру. Залишкова кінетична енергія потоку на момент досягнення границі центрального циліндру на проміжку від 6 до 5 не змінюється, а значить будуть зменшуватись всі складові швидкості в результаті збільшення "моменту інерції". В

З векторної діаграми на рис. 2 можна записати:

$$V_{кол} = V_e \cdot (1 - tg\alpha). \quad (1)$$

Кутова швидкість руху потоку:

$$\omega = \frac{V_{кол}}{r}, \quad (2)$$

де r – радіус обертання потоку.

Підставляємо (1) в (2) і отримуємо:

$$\omega = \frac{V_a \cdot (1 - tg\alpha)}{r}. \quad (3)$$

Визначимо відцентрову силу, що діє на частки повітряного потоку в каналі циклонного пристрою. Лінійна швидкість руху повітряного потоку по колу залежить від кута нахилу потоку до вертикальної осі, який залежить від нахилу гвинтової лінії перегородки. При цьому, швидкість руху в напрямку осі не змінюється, а збільшується шлях руху потоку в результаті його відхилення від вертикалі. Цим якраз обумовлено зростання очисної здатності циклонів і гідравлічних втрат, при збільшенні кута відхилення потоку від вертикалі.

Відцентрове прискорення, з яким рухається потік в циклоні:

$$a_e = \frac{V_{кол}^2}{r}. \quad (4)$$

З урахуванням (1) вираз (4) перепишемо у вигляді:

$$a_e = \frac{(V_a \cdot (1 - tg\alpha))^2}{r}. \quad (5)$$

Відцентрова сила, що діє на частки повітряного потоку в каналі циклонного пристрою:

$$F_e = m_q \cdot a_e, \quad (6)$$

де m_q – маса частинки в повітряному потоці.

Підставляємо (5) в (6) і отримуємо:

$$F_e = \frac{m_q \cdot (V_a \cdot (1 - tg\alpha))^2}{r}. \quad (7)$$

Оскільки частинка пилу рухається в повітрі, то на неї діє сила опору, яка залежить від розмірів частинки, її швидкості і в'язкості повітря.

Силу опору середовища визначаємо з формули Стокса [1]:

$$F_{он} = 3 \cdot \pi \cdot V_p \cdot d_q \cdot \mu_{нов}, \quad (8)$$

де V_p – швидкість руху частинки в радіальному напрямі в результаті дії на неї відцентрової сили; d_q – діаметр частинки; $\mu_{нов}$ – динамічна в'язкість повітря.

Якщо частинка має форму кулі, то її маса може бути визначена за формулою:

$$m_q = \frac{\pi \cdot d_q^3 \cdot \rho_q}{6}, \quad (9)$$

де ρ_q – густина матеріалу частинки.

Після входу запиленого потоку в циклон сили $F_{он}$ і F_e урівноважуються, тобто $F_{он} = F_e$. Враховуючи (7) і (8) умова рівноваги має вигляд:

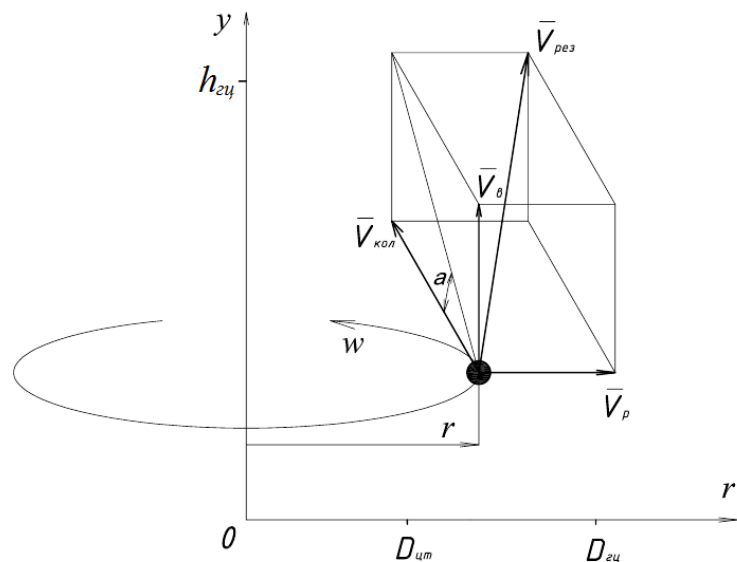


Рис. 2. Векторна діаграма швидкостей руху повітряного потоку в циклонному пристрої: y – напрямок вертикалі циклонного пристрою; $h_{ц}$ – висота циліндру; \bar{V}_e – швидкість частинки в напрямку вертикалі; $\bar{V}_{кол}$ – швидкість руху частинки по колу; \bar{V}_p – швидкість руху частинки в радіальному напрямку; $\bar{V}_{рез}$ – результуючий вектор швидкості руху частинки в каналі циклону; α – кут підйому гвинтової лінії перегородки; r – координата радіусу обертання частинки; $D_{ц}$ – діаметр циліндру; $D_{цм}$ – діаметр центральної труби; ω – кутова швидкість обертання повітряного потоку

$$3 \cdot \pi \cdot V_{\delta} \cdot d_{\pm} \cdot \mu_{\text{тiа}} = \frac{m_{\pm} \cdot (V_{\dot{a}} \cdot (1 - \text{tg}\alpha))^2}{r}. \quad (10)$$

Рівновага сил F_{on} і F_g означає, що частинка рухається в радіальному напрямі з постійною швидкістю V_p , яку можна визначити з рівняння рівноваги (10):

$$V_{\delta} = \frac{m_{\pm} \cdot (V_{\dot{a}} \cdot (1 - \text{tg}\alpha))^2}{3 \cdot \pi \cdot d_{\pm} \cdot \mu_{\text{тiа}} \cdot r}. \quad (11)$$

З урахуванням (9), отримуємо:

$$V_{\delta} = \frac{d_{\pm}^2 \rho_{\pm} \cdot (V_{\dot{a}} \cdot (1 - \text{tg}\alpha))^2}{18 \cdot \mu_{\text{тiа}} \cdot r}. \quad (12)$$

З частинок пилу, що рухаються в потоці, найбільший шлях до моменту контакту з поверхнею головного циліндру (рис. 2) пройде частинка, яка при вході в циклон знаходилася поблизу центральної труби, тобто мала початкову координату $D_{\text{цм}}$ (рис. 2). Її шлях в радіальному напрямі r рівний $(D_{\text{цн}} - D_{\text{цм}})/2$. Час для проходження цього шляху:

$$\tau_{\text{рад}} = \frac{(D_{\text{цн}} - D_{\text{цм}})}{2 \cdot V_p}. \quad (13)$$

Підставимо в формулу (13) значення V_p з формули (12), отримаємо вираз для часу руху частинки в радіальному напрямі:

$$\tau_{\text{раа}} = \frac{9(D_{\text{цн}} - D_{\text{цм}}) \cdot \mu_{\text{тiа}} \cdot r}{\rho_{\pm} \cdot d_{\pm}^2 \cdot (V_{\dot{a}} \cdot (1 - \text{tg}\alpha))^2}. \quad (14)$$

Час руху частинки в вертикальному напрямку залежить від висоти циліндру $h_{\text{цн}}$. Якщо вважати, що швидкість руху V_g постійна по висоті каналу, то час руху в вертикальному напрямі:

$$\tau_{\text{верт}} = \frac{h_{\text{цн}}}{V_g}. \quad (15)$$

При виконанні умови $\tau_{\text{верт}} = \tau_{\text{рад}}$, всі частинки (включаючи ті, що були біля центральної труби) гарантовано будуть локалізовані на внутрішній поверхні головного циліндру і готові до виходу за його межі в напрямку перегородки кришки і далі в порожнину зовнішнього корпусу (рис. 1). Запишемо умову $\tau_{\text{верт}} = \tau_{\text{рад}}$ з врахуванням (14) і (15):

$$\frac{h_{\text{цн}}}{V_{\dot{a}}} = \frac{9(D_{\text{цн}} - D_{\text{цм}}) \cdot \mu_{\text{тiа}} \cdot r}{\rho_{\pm} \cdot d_{\pm}^2 \cdot (V_{\dot{a}} \cdot (1 - \text{tg}\alpha))^2}. \quad (16)$$

Радіус руху часток r (рис. 2) лінійно збільшується від нуля, при $r(0) = D_{\text{цм}}/2$ до $r = D_{\text{цн}}/2$, тому можна його прийняти рівним:

$$r = \frac{D_{\text{цн}} - D_{\text{цм}}}{4}. \quad (17)$$

Тоді, з врахуванням (17), умова (16) приймає вигляд:

$$\frac{9 \cdot (D_{\text{цн}} - D_{\text{цм}})^2 \cdot \mu_{\text{тiа}}}{4 \cdot h_{\text{цн}} \cdot \rho_{\pm} \cdot d_{\pm}^2 \cdot V_{\dot{a}} \cdot (1 - \text{tg}\alpha)^2} = 1. \quad (18)$$

Визначимо залежність швидкості V_g від витрат повітря Q і геометричних параметрів циклонного пристрою. Для потоку, що рухається в каналі з постійним перетином:

$$V_g = \frac{Q_{\text{вх}}}{S_{\text{цн}}}, \quad (19)$$

де $S_{\text{цн}}$ – площа поперечного перетину каналу.

Для пристрою "труба в трубі", яким є канал в нижній частині нашого пристрою площу перетину

можна визначити за формулою:

$$S_{ци} = \frac{\pi}{4} (D_{ци}^2 - D_{мп}^2). \quad (20)$$

Тоді (19), з урахуванням (20):

$$V_{\epsilon} = \frac{4Q_{ex}}{\pi (D_{ци}^2 - D_{мп}^2)}. \quad (21)$$

Підставляємо (21) в (18) і остаточно отримуємо умову:

$$\frac{9 \cdot \pi (D_{\bar{a}\bar{a}}^2 - D_{\bar{o}\bar{o}}^2) (D_{\bar{a}\bar{a}} - D_{\bar{o}\bar{o}})^2 \cdot \mu_{\bar{r}\bar{i}\bar{a}}}{16 \cdot h_{\bar{a}\bar{a}} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot d_{\bar{a}}^2 \cdot Q_{\bar{a}\bar{a}} \cdot (1 - \operatorname{tg} \alpha)^2} = 1. \quad (22)$$

Отримана нами формула (22) представляє собою математичну модель нашого циклонного пристрою, що дозволяє визначати співвідношення геометричних і технологічних чинників, при якому частинки пилу будуть гарантовано, на 100%, відділені від повітряного потоку.

Визначальним параметром ефективності процесу очищення повітря в циклонах є оптимальне значення лінійної швидкості повітряного потоку в каналі. Для промислових циклонів значення оптимальної швидкості потоку повітря при нормальних умов за довідниковими даними становить 3,5...4,5 м/с.

Площу перетину каналу циклону, при умові оптимальної швидкості повітря визначимо за формулою:

$$S_{ч} = \frac{Q_{ex}}{V_{opt}}, \quad (23)$$

Оскільки діаметр нашого пристрою на порядок менше діаметру промислових циклонів, то для розрахунків, приймаємо більше значення оптимальної швидкості.

$$S_{ч} = \frac{350 \cdot 10^{-4}}{4,5} = 78 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

З врахуванням (20) отримуємо:

$$D_{ци} = \sqrt{\frac{4}{\pi} S_{ч} + D_{мп}^2} \quad (24)$$

Діаметр трубопроводу приймаємо рівним діаметру основного повітряного каналу пирососа (шланг, трубопроводи), який становить 40 мм. Тоді діаметр циліндру:

$$D_{ци} = \sqrt{\frac{4}{3,14} 78 \cdot 10^{-4} + 0,04^2} = 0,107 \text{ м}.$$

Для верхньої частини пристрою, де повітря рухається в трубі діаметром $D_{ци}$:

$$S_{ч6} = \frac{\pi}{4} D_{ци}^2. \quad (25)$$

З формули (25) отримуємо:

$$D_{ци} = 2 \sqrt{\frac{S_{ч6}}{\pi}}, \quad (26)$$

Тоді діаметр циліндру в верхній частині:

$$D_{ци} = 2 \sqrt{\frac{78 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 0,0997 \text{ м}.$$

Приймаємо діаметр циліндру 100 мм.

Тоді уточнене значення швидкості потоку в каналі нижньої частини пристрою:

$$V_{нк} = \frac{4Q}{\pi (D_{ци}^2 - D_{мп}^2)}; \quad (27)$$

$$V_{нк} = \frac{4 \cdot 350 \cdot 10^{-4}}{3,14 (0,1^2 - 0,04^2)} = 5,3 \text{ м/с}.$$

Швидкість потоку в каналі верхньої частини пристрою:

$$V_{вк} = \frac{4 \cdot 350 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,1^2} = 4,46 \text{ м/с}.$$

Для визначення значення кута α проведемо аналіз його впливу на процес відділення пилу за допомогою отриманої математичної моделі.

Для розрахунку нашого циклону потрібні наступні дані: витрати повітря Q_{ex} , м³/с; густина часток пилу ρ_c , кг/м³; динамічна в'язкість повітря при робочій температурі μ_r , Па·с. Густина повітря при 20°C 1,204 кг/м³; динамічна в'язкість повітря при $1,82 \cdot 10^{-5}$ (Н·с/м²); густина часток пилу різних матеріалів: скло, пісок – $\rho_c = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³; пластмаса – $\rho_c = 0,8 \dots 1,2 \cdot 10^3$ кг/м³; вугілля – $\rho_c = 1,4 \cdot 10^3$ кг/м³; деревина – $\rho_c = 0,5 \cdot 10^3$ кг/м³; бавовна (волокно) – $\rho_c = 1,2$ кг/м³.

З формули (20) отримуємо вираз для визначення критичного діаметру часток пилу залежно від змінних чинників:

$$d_{*min} = \frac{3}{4} \frac{(D_{\bar{\omega}} - D_{\delta\delta})}{1 - \operatorname{tg}\alpha} \sqrt{\frac{\pi(D_{\bar{\omega}}^2 - D_{\delta\delta}^2) \cdot \mu_{r\delta\delta}}{\rho_c \cdot h_{\bar{\omega}} \cdot Q_{\bar{\omega}}}} \quad (28)$$

Підставляємо в (28) відомі значення чинників і отримуємо формулу:

$$d_*(\alpha) = \frac{3}{4} \frac{(0,1 - 0,04)}{1 - \operatorname{tg}\alpha} \sqrt{\frac{3,14(0,1^2 - 0,04^2) \cdot 1,82 \cdot 10^{-5}}{\rho_c \cdot 0,115 \cdot 350 \cdot 10^{-4}}} = \frac{4,9 \cdot 10^{-4}}{1 - \operatorname{tg}\alpha} \sqrt{\frac{1}{\rho_c}} \quad (29)$$

За виразом (29) побудовані графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном від повітряного потоку, від кута нахилу гвинтової лінії перегородки, які представлені на рис. 3.

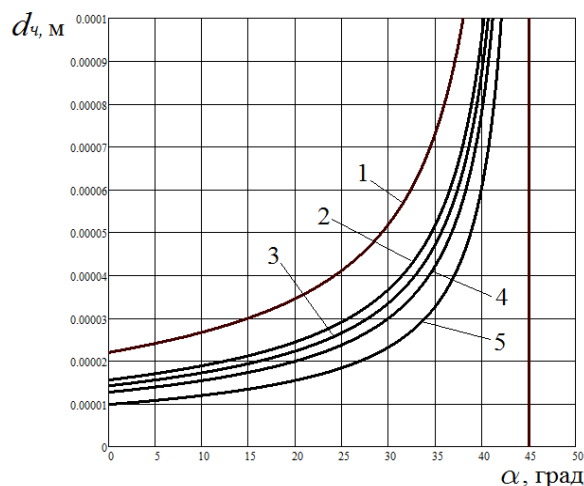


Рис. 3. Графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном від повітряного потоку, від кута нахилу гвинтової лінії перегородки: 1 – деревина; 2 – пластмаса; 3 – волокна бавовни; 4 – вугілля; 5 – скло (пісок)

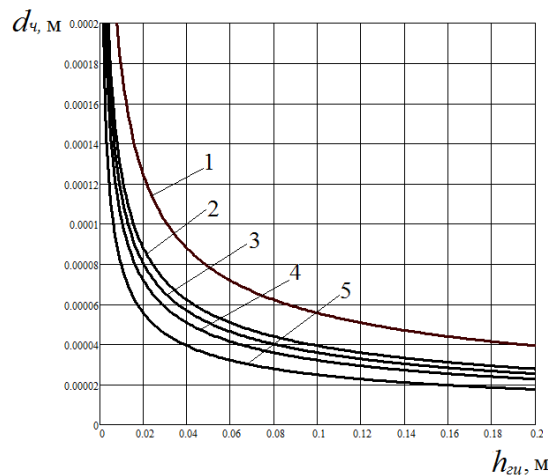


Рис. 4. Графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном, від висоти головного циліндра при значенні кута нахилу гвинтової лінії перегородки $\alpha = 30^\circ$: 1 – деревина; 2 – пластмаса; 3 – волокна бавовни; 4 – вугілля; 5 – скло (пісок)

З графіків на рис. 3. видно, що здатність відділення пилу зменшується, при збільшенні кута підйому гвинтової лінії і стає "нульовою" при $\alpha = 45^\circ$. З точок перетину графіками вісі ординат можна визначити найменший діаметр часток матеріалів, які теоретично можуть відділятися від повітряного потоку, при нульовій продуктивності циклонного пристрою ($\alpha = 0^\circ$). Зі зменшенням кута α збільшується гідравлічний опір циклонного пристрою, тому потрібно вибирати значення кута підйому гвинтової лінії перегородки, якому відповідає задовільне відділення пилу. Приймаємо $\alpha = 30^\circ$.

Проведемо аналіз впливу висоти головного циліндру $h_{цл}$ на процес відділення пилу за допомогою отриманої математичної моделі. З формули (22) отримуємо вираз для визначення критичного діаметру часток пилу залежно від висоти головного циліндру $h_{цл}$:

$$d_*(h_{\bar{\omega}}) = \frac{3}{4} \frac{(0,1 - 0,04)}{1 - \operatorname{tg}30} \sqrt{\frac{3,14(0,1^2 - 0,04^2) \cdot 1,82 \cdot 10^{-5}}{\rho_c \cdot 0,115 \cdot 350 \cdot 10^{-4}}} = 3,93 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{1}{\rho_c \cdot h_{\bar{\omega}}}} \quad (30)$$

За виразом (30) побудовані графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном від висоти головного циліндра, які представлені на рис. 4.

З графіків видно, що збільшення $h_{цл}$ веде до зменшення діаметру часток, що на 100% будуть відділені від потоку. Але градієнт цього зменшення різко зменшується, при $h_{цл} > 0,04 \dots 0,06$ м. Тому

прийнята нами висота $h_{\text{ци}} = 0,115$ м, що обумовлена обмеженням висоти пирососа є дуже навіть достатньою. Тобто робити пиросос високим за рахунок висоти циклону немає сенсу.

Проведемо аналіз впливу діаметру головного циліндру $h_{\text{ци}}$ на процес відділення пилу за допомогою отриманої математичної моделі.

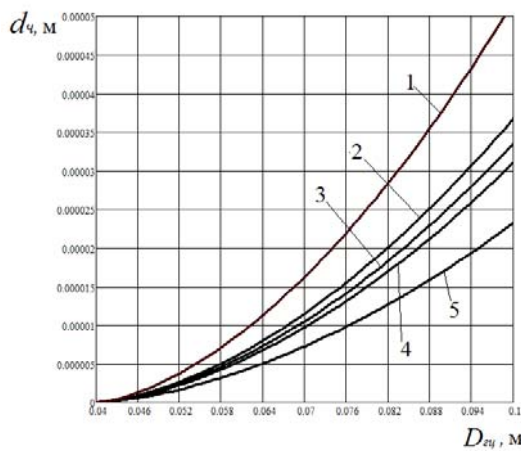


Рис. 5. Графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном, від діаметру головного циліндру при значенні кута нахилу гвинтової лінії перегородки $\alpha = 30^\circ$: 1 – деревина; 2 – пластмаса; 3 – волокна бавовни; 4 – вугілля; 5 – скло (пісок)

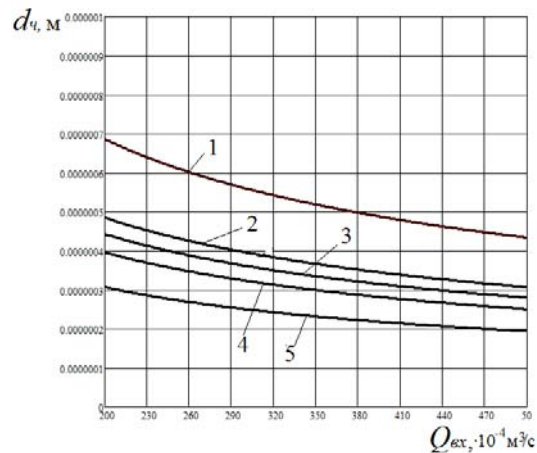


Рис. 6. Графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном, від витрат повітряного потоку, при значенні кута нахилу гвинтової лінії перегородки $\alpha = 30^\circ$: 1 – деревина; 2 – пластмаса; 3 – волокна бавовни; 4 – вугілля; 5 – скло (пісок)

З формули (22) отримуємо вираз для визначення критичного діаметру часток пилу в залежності від діаметру головного циліндру $D_{\text{ци}}$:

$$d_{\pm}(D_{\text{ци}}) = \frac{3(D_{\text{ци}} - 0,04)}{4(1 - \text{tg}30)} \sqrt{\frac{3,14(D_{\text{ци}}^2 - 0,04^2) \cdot 1,82 \cdot 10^{-5}}{\rho_{\pm} \cdot 0,115 \cdot 350 \cdot 10^{-4}}} = 0,211 \cdot (D_{\text{ци}} - 0,04) \sqrt{\frac{(D_{\text{ци}}^2 - 0,0016)}{\rho_{\pm}}}. \quad (31)$$

За виразом (31) побудовані графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном, від діаметру головного циліндру, які представлені на рис. 5.

Висновки

З графіків на рис. 5 видно, що при розрахованому нами діаметрі циліндру 0,1 м гарантовано відділяються від повітряного потоку частки всіх матеріалів, що мають діаметр 20 мкм.

Проведемо аналіз впливу на процес відділення пилу коливань витрат вхідного потоку, що може відбуватись в результаті використання різних насадок, заповнення циклонного пристрою сміттям, а також при регулюванні швидкості електродвигуна агрегату.

З формули(22) отримуємо вираз для визначення критичного діаметру часток пилу залежно від $Q_{\text{вх}}$:

$$d_{\pm}(Q_{\text{вх}}) = \frac{3(0,1 - 0,04)}{4(1 - \text{tg}30)} \sqrt{\frac{3,14(0,1^2 - 0,04^2) \cdot 1,82 \cdot 10^{-5}}{\rho_{\pm} \cdot 0,115 \cdot Q_{\text{вх}}}} = 2,17 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{1}{\rho_{\pm} \cdot Q_{\text{вх}}}}. \quad (32)$$

За виразом (32) побудовані графіки залежності діаметру часток матеріалів, що гарантовано відділяються циклоном від діаметру головного циліндру, які представлені на рис. 6.

З графіків на рис. 6 видно, що при коливанні продуктивності агрегату пирососа в межах $350 \times 10^{-4} \pm 150 \times 10^{-4}$ м³/с критичний діаметр часток матеріалів змінюється незначно ($\pm 30\%$), отже коливання і зміни продуктивності не будуть негативно впливати на роботу очисного пристрою.

Література

1. Зиганшин М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А.Колесник, В.Н. Посохин. – М. : «Экопресс – 3М», 1998. – 445 с.

References

1. Ziganshin M.G. Proektirovanie apparatov pyilegazoochistki / M.G. Ziganshin, A.A.Kolesnik, V.N. Posohin. – М. : «Ekopress – 3M», 1998. – 445 s.

УДК 614.841.33

Л.Б. ДЕМИДЧУК, Д.І. САПОЖНИК
Львівський торговельно-економічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРО- ТА ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ ПОВЕРХНЕВОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ

В роботі досліджено питання щодо можливості підвищення температуро- та вогнестійкості залізобетонних конструкцій шляхом поверхневого оброблення захисними покриттями, закономірності процесів формування структуроутворюючого каркасу силіційорганічних сполук на основі наповнених поліметилфенілсилоксанів та можливості розроблення ефективних методів їх використання з врахуванням рецептур вихідних композицій для температуро- і вогнестійких захисних покриттів будівельних конструкційних матеріалів та визначено умови формування вогнезахисного покриття на поверхні залізобетонних конструкцій. Запропоновано склади вихідних композицій для захисних покриттів та вивчено їх вплив на вогнестійкість та довговічність залізобетонних конструкцій в умовах високотемпературного нагрівання та пожежі.

Ключові слова: температуро- та вогнестійкість покриття, вихідна композиція, залізобетонна конструкція, вогнестійкість.

L.B. DEMYDCHUK, D.I. SAPOZHNIK
Lviv University of Trade and Economics

INCREASE OF TEMPERATURE AND FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY SURFACE TREATMENT WITH PROTECTIVE COATINGS

The problem of the possibility of increasing the temperature and fire resistance of reinforced concrete structures by surface treatment with protective coatings, regularities of the processes of formation of the structure-forming framework of organosilicon compounds on the basis of the filled polymethylphenylsiloxanes and the possibility of developing effective materials and the conditions for the formation of fire protection coating on the surface of reinforced concrete structures have been determined. The composition of the initial compositions for protective coatings was proposed and their influence on fire resistance and durability of reinforced concrete structures in conditions of high temperature heating and fire was studied. *The methods of physic-chemical analysis have established that in the process of heating, due to the thermo oxidative degradation of the polysiloxane film forming agent, gaseous products are formed that cause the coating to flush with the formation of a heat-insulating protective layer, the nature of which depends on the thickness of the initial coating, temperature and heating gradient. The dependence of the coefficient of diffusion of the protective coating on the thickness, velocity and temperature of heating is established, indicating its parameters in wide limits. The optimum hardening of the protective coating on the concrete surface, which is achieved when heated to 473 K or at room temperature for 24 hours, is experimentally established. The porosity of the protective layer depends on the temperature of the heating, the thickness of the coating and the speed of raising the temperature. It is proved that with increasing thickness of the coating from 300 to 800 microns, due to its collapse, the porosity index increases in 5,0-7,5 times, and with an increase in the temperature gradient from 20 to 60 deg/min - at 8.2-8.4 times. The effectiveness of fire protection of reinforced concrete structures with developed protective coatings has been proved. At their use, the limit of fire resistance of reinforced concrete structures for thermal insulation capacity increases 1.8-2.1 times.*

Keywords: temperature and fire resistance of coating, initial composition reinforced concrete fire resistance.

Постановка проблеми

Нормативними документами України (ДБН В.1.1.7 – 2016) [1] встановлено, що межа вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій визначається розрахунковим методом або шляхом вогневих випробувань та повинна складати не менше 45 хв. З урахуванням сучасних технологій будівництва, а саме зменшення перерізу основних будівельних залізобетонних конструкцій, для забезпечення необхідної межі вогнестійкості доцільно використовувати вогнезахисні покриття.

В реальних умовах експлуатації залізобетонні конструкції піддаються комплексній дії агресивних факторів, які у значній мірі підсилюються в умовах високих температур та вогню. Головним фактором, який впливає на залізобетонні конструкції при дії вказаних факторів є втрата міцнісних характеристик і як результат – руйнування.

Підвищити вогнестійкість залізобетонних конструкцій можливо шляхом їх поверхневої модифікації захисними матеріалами різної хімічної природи.

Розроблені на даний час склади покриттів не забезпечують необхідного захисту таких будівельних конструкцій в експериментальних умовах пожежі [3, 4]. Тому підвищити вогнестійкість залізобетонних конструкцій можливо шляхом нанесення на їх поверхню наповнених вогнетривкими компонентами полісилоксанів, які володіють високими термостабільними властивостями в широкому інтервалі температур. В умовах дії високих температур при пожежі на вогнестійкість захищених залізобетонних конструкцій впливає фазовий склад покриття за рахунок значної різниці термомеханічних властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поліфункціональні захисні покриття на основі наповнених полісилоксанових композицій технологічні та можуть використовуватися для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкційних матеріалів внаслідок високих термомеханічних властивостей, які визначаються стабільним структурним та фазовим складом [2, 3]. Але, внаслідок гетерофазової будови та дії високих температур пожежі значний вплив на формування захисного теплоізоляційного шару мають процеси на межі контакту «покриття – бетон» [3, 5].

Разом з тим, вирішення питання впливу способу нанесення захисного покриття на поверхню залізобетону, його товщини, температури пожежі та складу вихідної композиції на вогнестійкість обробленого матеріалу залишається актуальним.

Формулювання цілі статті

Метою дослідження було дослідження впливу захисного покриття на основі наповненого оксидними компонентами полісилоксану на температуро- та вогнестійкість залізобетонних конструкцій.

Базовий склад вихідних композицій для вогнезахисних покриттів (табл. 1) обрано за допомогою методу математичного планування експерименту.

Таблиця 1

Склади вихідних композицій для захисних покриттів

№ складу покриття	Вміст компонентів, мас. %					
	КО-08	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Каолін	Каолінове волокно	Шамотний бій
1	20	40	35	-	5,0	-
2	40	20	38	-	2,0	-
3	25	40	10	20	5,0	-
4	35	35	18	10	2,0	-
5	30	30	22	12,5	3,5	2,0
6	35	25	25	10	2,0	3,0

Агрегативностійкі композиції із рівновисокою однорідністю отримано шляхом сумісного механохімічного диспергування компонентів у кульових млинах за рахунок процесів руйнування кристалічної ґратки оксидного наповнювача та добавки, фізичної адсорбції та прививання фрагментів полісилоксанового плівкоутворювача до поверхні наповнювача. Методом ІЧ-спектроскопії визначено оптимальний термін диспергування (100 – 125 год) та масу привитого полімера (5,7 – 6,3 мас. %).

Проведені та опубліковані експериментальні дослідження показали, що текучість вихідної композиції залежить тільки від вмісту плівкоутворювача (20 – 26 сек.) а сухий залишок складає 75 – 85 мас.%. Міцність на згин розроблених складів покриттів 1 – 2 мм та залежить тільки від вмісту наповнювача. Міцність на удар є лише функцією складу вихідної композиції та змінюється в межах 4,0 – 5,0 Дж [6].

Експлуатаційні властивості захисних покриттів (адгезійна міцність, суцільність, вогнестійкість, тощо) значною мірою залежать від технологічного режиму їх нанесення на поверхню бетону та умов затвердіння. Попередніми дослідженнями [3, 5, 6] встановлено, що після нанесення вихідної композиції для захисного покриття на поверхню бетону проходить випаровування органічного розчинника з повною полімеризацією полісилоксанового плівкоутворювача з утворенням міцного захисного шару. При цьому полісилоксан виконує роль матриці, дисперсійною фазою є частинки алюмінію, цирконію оксидів, шамотний бій, каолін та каолінове волокна. Залежно від складу вихідної композиції, мікротвердість утвореного захисного покриття на поверхні бетону, що є критерієм ступеня затвердіння, змінюється у широких межах.

Вивчено вплив умов затвердіння захисного покриття на його мікротвердість за режимами:

- 1 - витримане 2 години при температурі 353 К;
- 2 - витримане 1 година при температурі 423 К;
- 3 - витримане 0,1 години при температурі 473 К;
- 4 - витримане 24 години при температурі 293 К.

Результати досліджень наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Зміна мікротвердості захисних покриттів в залежності від режиму затвердіння

№ складу покриття	Мікротвердість в залежності від режиму затвердіння, МПа,			
	1	2	3	4
1	264,5	289,3	271,7	243,2
2	263,4	278,9	269,8	231,7
3	247,3	271,3	260,4	225,3
4	252,7	275,7	263,2	233,5
5	250,4	270,2	259,3	229,1
6	262,5	282,3	265,9	242,3

Експериментально встановлено, що найвищі показники мікротвердості (271,3 – 289,3 МПа) захисного покриття отримано за 2 режимом затвердіння. При цьому воно корелюється з вмістом наповнювача та залежить від масової частки каоліну. Мінімальні показники мікротвердості (225,3 – 243,2 МПа) характерні для захисних покриттів, які затвердівали за 4 режимом. Із врахуванням технологічних умов затвердіння та енергоощадливості, задовільних показників мікротвердості, для отримання захисних покриттів доцільно використати достатньо простий режим, а саме – 24 години при кімнатній температурі (293 К).

Нанесення вихідних композицій для захисних покриттів проводили за допомогою пульверизатора на попередньо очищену від пилу та висушену до вологості не вище 3 мас.% поверхню бетону. Товщина

захисного покриття складала 0,4 – 0,6 мм.

Методами фізико-хімічного аналізу встановлено, що у процесі нагрівання за рахунок термоокисної деструкції полісилоксанового плівкоутворювача утворюються газоподібні продукти, що призводять до спучування покриття з утворенням теплоізоляційного захисного шару, характер якого залежить від товщини вихідного покриття, температури та градієнта нагрівання.

Встановлена залежність коефіцієнта спучення захисного покриття від товщини, швидкості та температури нагрівання (табл. 3), що вказує на його показники у широких межах.

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта спучення покриття від товщини та швидкості температури нагрівання

№ складу покриття	Товщина покриття, мкм	Коефіцієнт спучення (Ксп) при температурі нагрівання (К)											
		573			673			773			873		
		Швидкість зростання температури (град/хв.)											
		20	60	120	20	60	120	20	60	120	20	60	120
2	400	1,14	1,82	3,12	2,87	5,14	6,21	3,02	7,12	8,14	3,07	8,12	10,41
	600	1,57	2,03	3,81	3,02	6,02	7,01	3,51	8,03	9,12	3,82	9,14	11,07
	800	1,92	2,87	4,03	3,41	7,93	8,14	3,91	9,02	10,14	4,03	10,10	11,97
5	400	1,16	1,91	3,08	2,91	5,27	6,31	3,09	7,51	8,27	3,12	8,47	10,37
	600	1,61	2,09	3,78	2,98	5,19	6,37	3,62	8,12	9,21	3,91	9,07	10,93
	800	2,01	2,17	4,18	3,31	7,12	8,21	4,01	8,93	10,02	3,98	10,12	11,37
6	400	1,21	2,01	3,17	3,01	5,21	6,37	3,87	7,14	8,93	3,93	8,53	10,87
	600	1,57	2,12	4,01	3,17	5,91	7,17	3,91	7,97	9,91	4,17	9,85	11,43
	800	2,07	2,37	4,33	3,53	6,95	8,29	4,02	8,91	10,14	4,83	10,19	11,87

Так, при нагріванні до температури 573 К коефіцієнт спучення залежить від товщини і швидкості нагрівання. Збільшення товщини покриття приводить до зростання коефіцієнта спучення у 3 – 3,3 рази, а підвищення показника швидкості нагрівання – у 1,35 – 1,9 раз, що залежить від товщини покриття.

Слід відзначити, що збільшення товщини покриття менш суттєво впливає на коефіцієнт спучення. Підвищення температури нагрівання до 873 К веде до значного зростання коефіцієнта спучення, особливо при нагріванні із швидкістю 120 град/хв., а підвищення температури нагрівання до 873 К частково збільшує коефіцієнт спучення для покриттів із різним значенням товщини.

Максимальне значення коефіцієнта спучення (11,97 та 11,87) характерне для покриттів складів № 1 та № 5 при їх товщині 800 мкм та швидкості нагрівання 120 град/хв. Нагрівання захисних покриттів вище від температури 873 К призводить до незначного зменшення коефіцієнта спучення внаслідок спікання покриттів та утворення більш щільної структури.

Вивчено вплив товщини захисного покриття на показник загальної пористості у період термоокисної деструкції полісилоксанового плівкоутворювача (в інтервалі температур 573 – 873 К). Встановлено (рис. 1 а), що збільшення показника загальної пористості на 6 – 16 % проходить при нагріванні до температури 573 К при товщині захисного покриття 400 – 600 мкм.

Для захисного покриття товщиною 600 мкм визначена залежність показника загальної пористості від температури нагрівання (рис. 1 б).

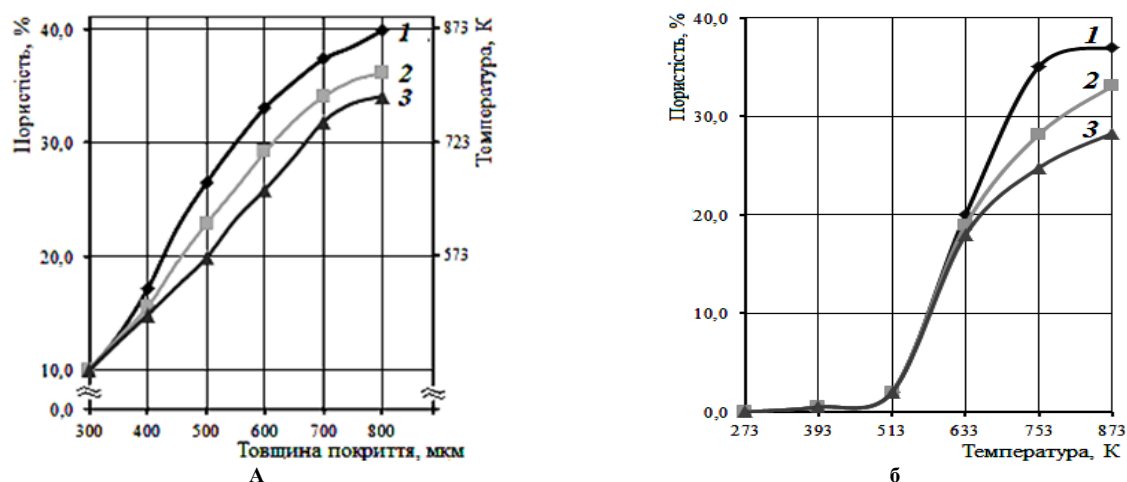


Рис. 1. Залежність показника загальної пористості захисного покриття від товщини (а) та від температури нагрівання (б): 1 – склад № 2; 2 – склад № 5; 3 – склад № 6

При нагріванні покриття до температури 513 К показник загальної пористості складає 2 % за рахунок випаровування залишків розчинника. Зростання кривих залежності показника пористості при нагріванні вище

від температури 623 К проходить за рахунок процесів термоокисної деструкції полісилоксану. Максимальне значення загальної пористості знаходиться при нагріванні до температури 753 К (максимум процесу деструкції). Слід відзначити, що мінімальне значення загальної пористості (28,3) має покриття складу № 6.

Підвищення температури нагрівання вище від 753 К веде до зменшення показника пористості внаслідок перебігу процесів взаємодії між компонентами із утворенням нових силікатних фаз, які ущільнюють структуру матеріалу за рахунок спікання.

Ефективність вогнезахисту залізобетонних конструкцій визначили у вогневій печі згідно СТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання. (Дата введення в дію: 01.10.2011) (табл. 4).

Таблиця 4

Межа вогнестійкості залізобетонних зразків за втратою теплоізоляційної здатності

	№ складу покриття						
	1	2	3	4	5	6	Без покриття
Межа вогнестійкості, хв	108	115	126	122	120	112	60

Отримані результати підтверджують доцільність використання розроблених складів захисних покриттів на основі наповненого оксидними та силікатними компонентами полісилоксану для підвищення у 1,8 – 2,1 рази межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій за втратою теплоізоляційної здатності.

Висновок

Експериментально встановлено оптимальний режим затвердіння захисного покриття, на поверхні бетону, яке досягається при нагріванні до температури 473 К або при витримуванні при кімнатній температурі протягом 24 год. Пористість захисного шару залежить від температури нагрівання, товщини покриття та швидкості підняття температури. Доведено, що при збільшенні товщини покриття від 300 до 800 мкм за рахунок його случення показник пористості зростає у 5,0 – 7,5 рази, а при підвищенні градієнта температур від 20 до 60 град/хв – у 8,2 – 9,4 рази.

Доведено ефективність вогнезахисту залізобетонних конструкцій розробленими складами захисних покриттів. При їх використанні межа вогнестійкості залізобетонних конструкцій за теплоізоляційною здатністю зростає у 1,8 – 2,1 рази.

Література

1. ДБН В.1.1.7 – 2016. Державні будівельні норми України. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – На зміну ДБН В.1.1.7 2002, чинний з 1 червня 2017 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.mil.gov.ua/content/other/TO_tkanuna_watermark.pdf.
2. Литовченко С. В. Повышение стабильности многофазных силицидных покрытий на молибдене / С. В. Литовченко, Т. С. Маслова, В. Г. Кириченко и др. // Вісн. НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 52. – С. 94–98.
3. Лукин Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой / Е. С. Лукин // Огнеупоры и техническая керамика. – 1996. – № 4. – С. 2–13.
4. Aguilar-Santillan Joaguin. Mechanical activation of the decomposition and sintering of kyanite / Joaguin Aguilar-Santillan, Ricardo Cuenca-Alvarez, Heberto Balmori-Ramires // J. Amer. Ceram. Soc. – 2002. – № 10. – P. 2425–2431.
5. Пашенко А. А. Полифункциональные элементоорганические покрытия / Пашенко А. А. – К. : Вища школа, 1987. – 198 с.
6. Демидчук Л. Б. Органосилікатні температуростійкі покриття для будівельних матеріалів / Л. Б. Демидчук, М. М. Гивлюд, І. В. Маргаль // Вісник Хмельницького Національного університету. – Хмельницький, 2012. – № 1. – С. 92–96.

References

1. DBN V.1.1.7 – 2016. Derzhavni budivelni normy Ukrainy. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. – Na zminu DBN V.1.1.7 2002, chynnyi z 1 chervnia 2017 r. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.mil.gov.ua/content/other/TO_tkanuna_watermark.pdf.
2. Lytovchenko S. V. Povyshenye stability mnohofaznykh sylitsydneykh pokrytyi na molybdene / S. V. Lytovchenko, T. S. Maslova, V. H. Kyrychenko y dr. // Visn. NTU «KhPI». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2005. – № 52. – S. 94–98.
3. Lukyn E. S. Sovremennaiia vysokoplotnaia oksyidnaia keramyka s rehulyruemoi mykrostrukturoi / E. S. Lukyn // Ohneupory y tekhnicheskaiia keramyka. – 1996. – № 4. – S. 2–13.
4. Aguilar-Santillan Joaguin. Mechanical activation of the decomposition and sintering of kyanite / Joaguin Aguilar-Santillan, Ricardo Cuenca-Alvarez, Heberto Balmori-Ramires // J. Amer. Ceram. Soc. – 2002. – № 10. – P. 2425–2431.
5. Pashchenko A. A. Polyfunktsonalnye elementoorhanycheskye pokrytyia / Pashchenko A. A. – K. : Vyshcha shkola, 1987. – 198 s.
6. Demydchuk L. B. Orhanosylikatni temperaturostiiiki pokryttia dlia budivelynykh materialiv / L. B. Demydchuk, M. M. Hyvliud, I. V. Marhal // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2012. – № 1. – S. 92–96.

РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЩІЛЬНОСТІ КАНАЛІВ ТА ЕКВІВАЛЕНТНОГО ДІАМЕТРУ КАНАЛІВ БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

На основі теорії стохастичних процесів розроблені методи розрахунку основних характеристик контакту спряжених поверхонь беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень. Результатом є створення інженерних методів розрахунку герметичності (тривалості натікання газу) в беззмашувальних циліндро-поршневих металополімерних ущільненнях. В статті розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерна поверхня) з гладкою (металева поверхня). Поставлено задачу розробити інженерні методи розрахунку основних характеристик контакту спряжених поверхонь беззмашувальних циліндро-поршневих металополімерних ущільнень – середньої висоти зазору та питомої площі шорсткої поверхні контакту, а також виконати аналіз точності розроблених методів.

Ключові слова: контакт; номінальний контактний тиск; питома площа шорсткої поверхні контакту; щільність каналів; еквівалентний діаметр каналів; тривалість натікання газу; беззмашувальні циліндро-поршневі ущільнення; профілограма, теорія стохастичних полів.

O.G. TYMOSHCHUK
Khmelnitskyi National University

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF ACCURACY OF CALCULATION METHODS THE DENSITY OF THE CHANNELS AND THE EQUIVALENT DIAMETER OF THE CHANNELS OF OIL-FREE CYLINDER-PISTON SEALS

On the basis of the theory of stochastic processes, methods for calculating the main characteristics of the contact of the conjugated surfaces of the non-greasy cylinder-piston seals are developed. The result is the creation of engineering methods for calculating the tightness (duration of gas leakage) in the non-greasy cylinder-piston metal-polymer seals. The article deals with the elastic contact of a strongly anisotropic rough surface (polymeric surface) with a smooth (metal surface). The task is to develop and investigate engineering methods for calculating the main characteristics of the sealing of the non-greasy cylinder-piston seals - the density of the channels and the equivalent diameter of the channels in the zone of coupling of metal-polymer seals, as well as perform the analysis of the accuracy of the developed methods. The dependence of the density of channels on the complex of contact conditions is of an extreme nature. The channel density (the number of channels per unit of nominal profile length recorded in the transverse direction to the direction of the medium stream) can be calculated as the difference between the surface of contact surfaces that have come into contact and the density of the depressions that are above a given level. Mode of flow of gas in the seal is determined by the Knudsen criterion. On the basis of the formula of the effective level of deformation for a given value of the complex of contact conditions with the help of Kanal [7], written using the software product Mathcad 2000 Professional, the relationship of channel density with the complex of contact conditions is calculated. As the contact conditions increase, the density of the channels initially increases, and then decreases. This is due to the influence of the process of fusion of contact spots in the loading process. The maximum number of channels is reached at $K = 0.6315$. To determine the channel density, the exact formula is derived. On the basis of the exact formula, the calculated formula is obtained. Values calculated from the exact and calculated channel density formula do not differ by more than 0.0045. Precise formulas of equivalent diameters are derived. Dependence of equivalent diameters from the complex of contact conditions is investigated. On the basis of exact formulas, the calculated formulas of equivalent diameters are obtained. Values calculated on the exact and calculated formula of the consolidated equivalent diameter do not differ by more than 9%, for the consolidated equivalent diameter the difference does not exceed 10%.

Keywords: contact; nominal contact pressure; specific area of the rough surface of the contact; channel density; equivalent diameter of channels; duration of gas flow; non-greasy cylinder-piston seals; profile graph, theory of stochastic fields.

Постановка проблеми. Методи розрахунку герметичності беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень базуються на поєднанні фізичних законів, що описують процес натікання робочого середовища (газу) з закономірностями, що визначають характеристики контакту шорстких анізотропних поверхонь, такі як фактична площа контакту, міжконтактний об'єм, середній зазор. Втрати робочого середовища залежать від кубу середнього зазору, тому похибка в 20% в визначенні цієї величини призводить до похибки в 73% при розрахунку натікань. Таким чином, точність розрахунку натікань значною мірою залежить від точності розрахунку характеристик контакту та характеристик герметичності циліндро-поршневих ущільнень.

Існуючі методи розрахунку герметичності використовують формули визначення характеристик контакту за способом опорних кривих [1–3]. Цей спосіб має низьку точність внаслідок того, що він не бере до уваги, що профілограма дає спотворене уявлення про поверхню, оскільки проходить не через вершини виступів, а схилами нерівностей. Значення величини згладжування та максимальної висоти нерівностей, необхідні для визначення характеристик контакту, визначаються за способом опорних кривих з дуже низькою точністю – для точного визначення цих величин необхідно, щоб профілограма пройшла одночасно через найвищу вершину поверхні та через саму глибоку впадину, ймовірність цього практично рівна нулю. Значно точніше характеристики контакту можна визначити за способом стохастичних процесів. Суть цього способу полягає в тому, що шорстка поверхня розглядається як реалізація стохастичного поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробці методів розрахунку основних характеристик контакту шорстких анізотропних поверхонь присвячені роботи Семенюка М.Ф. [5], Бачинської Н.К. [6], інших авторів. Питання герметичності циліндро-поршневих та торцевих ущільнень розглядалися в роботах

Семенюка М.Ф. [5], Калди Г.С. [4], Бачинської Н.К. [6], в яких розрахунки базуються на застосуванні теорії стохастичних процесів. Найбільш детально розроблені розрахунки герметичності беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень в роботі [7].

Формулювання цілі статті. Необхідно розробити і дослідити інженерні методи розрахунку основних характеристик герметичності беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень – щільності каналів та еквівалентного діаметру каналів в зоні спряження металополімерних ущільнень.

Виклад основного матеріалу. Якщо дзеркально відобразити точки шорсткої поверхні відносно її середньої площини, то виступи перетворяться у впадини і навпаки. Звідси випливає, що щільність ймовірності висот впадин $\varphi(\varepsilon)$ і щільність висот вершин $p(\varepsilon)$ зв'язані простим співвідношенням:

$$\varphi(\varepsilon) = p(-\varepsilon). \tag{1}$$

Зважаючи на формулу щільності ймовірності висот виступів профілю (максимумів нормального стохастичного процесу), маємо:

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right) - \sqrt{\pi}\chi\varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) [1 - \operatorname{erf}(\chi\varepsilon)] \right\}. \tag{2}$$

Щільність каналів δ_k (кількість каналів, що приходиться на одиницю номінальної довжини профілю, записаного у поперечному напрямку до напрямку плинину середовища) може бути розрахована як різниця між щільністю δ' виступів поверхні, які вступили в контакт, та щільністю δ'' впадин, які розташовані вище даного рівня u :

$$\delta_k = \delta' - \delta'' . \tag{3}$$

Позначимо D – щільність виступів поверхні. Тоді величина δ' визначиться за формулою:

$$\delta' = D \int_u^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon . \tag{4}$$

В силу статистичної симетрії шорсткої поверхні відносно її середньої площини щільність впадин поверхні рівна щільності виступів. Враховуючи це, маємо:

$$\delta'' = D \int_u^{\infty} \varphi(\varepsilon) d\varepsilon . \tag{5}$$

Підставивши (4) і (5) в (3), отримаємо:

$$\delta_k = D \left[\int_u^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon - \int_u^{\infty} \varphi(\varepsilon) d\varepsilon \right] . \tag{6}$$

Перетворимо вираз у дужках, враховуючи формулу щільності ймовірності висот виступів профілю та формулу (2):

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2\pi}}{\delta} \int_u^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon &= \int_u^{\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right) d\varepsilon + \sqrt{\pi}\chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon + \\ &+ \sqrt{\pi}\chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) \operatorname{erf}(\chi\varepsilon) d\varepsilon \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2\pi}}{\delta} \int_u^{\infty} \varphi(\varepsilon) d\varepsilon &= \int_u^{\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right) d\varepsilon - \sqrt{\pi}\chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon + \\ &+ \sqrt{\pi}\chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) \operatorname{erf}(\chi\varepsilon) d\varepsilon \end{aligned} \tag{8}$$

Підставимо (7) і (8) в (6):

$$\delta_k = \sqrt{2}D\delta\chi \int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon . \tag{9}$$

Інтегруємо:

$$\int_u^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon = \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right). \quad (10)$$

З урахуванням формули параметра широкополосності α - безрозмірної величини, що визначається за формулою:

$$\alpha = m_0 m_4 / m_2^2,$$

формули щільності вершин шорсткої поверхні D :

$$D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$$

та позначень до формули щільності ймовірності висот виступів профілю, перетворимо множник формули (9):

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \delta\chi &= \left(\frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right)^{1/2}; \\ \sqrt{2} D \delta\chi &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Підставивши (10) і (11) в (9), отримаємо формулу:

$$\delta_k = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right). \quad (12)$$

На підставі формули ефективного рівня деформації за заданою величиною комплексу умов контактування:

$$1 - \exp(-K) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) = 0 \quad (13)$$

та формули (12) за допомогою програми Kanal [7], написаної з використанням програмного продукту Mathcad 2000 Professional, розрахований зв'язок щільності каналів з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 1.

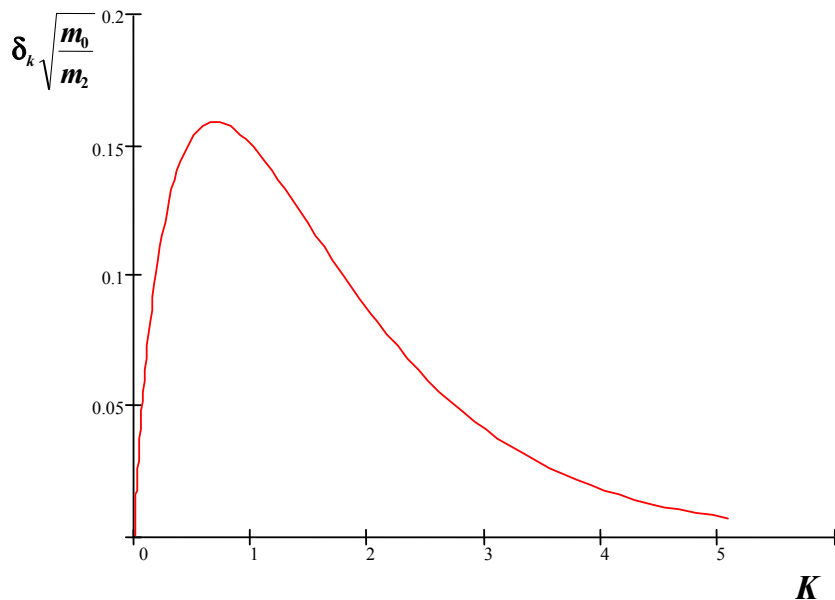


Рис. 1. Залежність щільності каналів від комплексу умов контактування

Очевидно, що залежність щільності каналів від комплексу умов контактування носить екстремальний характер. З ростом комплексу умов контактування щільність каналів спочатку зростає, а потім зменшується. Це пояснюється впливом процесу злиття плям контакту в процесі навантаження. Максимальна кількість каналів досягається при $K = 0,69315$ і становить

$$\delta_{k, \max} = 0,15915 \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2}. \quad (14)$$

Залежність, представлена на рис.1, була апроксимована формулою:

$$\delta_k = 0,787 \left(\frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} K^{0,733} \exp \left[- (K + 0,633)^{1,028} \right]. \quad (15)$$

Формула (15) отримана в результаті розрахунків за програмою Appr_K [7].

Режим натікання газу в ущільненні визначається за критерієм Кнудсена [8], тобто за величиною співвідношення $\bar{\lambda}/d_{\text{екв}}$:

- $\bar{\lambda}/d_{\text{екв}} > 1,0$ – молекулярний режим;
- $\bar{\lambda}/d_{\text{екв}} < 0,01$ – в'язкісний режим;
- $0,01 \leq \bar{\lambda}/d_{\text{екв}} \leq 1,0$ – перехідний режим,

де $d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр каналів;

$\bar{\lambda}$ – середня довжина вільного пробігу молекули газу, яка розраховується за формулою [8]:

$$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}d_m^2 p_{\text{ср}}}, \quad (16)$$

де k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура газу;

d_m – ефективний діаметр молекули газу;

$p_{\text{ср}}$ – середній тиск газу в ущільненні.

Для знаходження еквівалентних діаметрів каналів часто [9, 8, 10] користуються поняттям еквівалентного гідравлічного діаметру, який визначають за формулою:

$$d_h = \frac{4F}{P},$$

де F, P – відповідно площа та периметр каналу.

Цей підхід виправдовує себе в тих випадках, коли висота і ширина каналу не дуже різняться. В той же час, викликає сумнів правомірність такого підходу до розрахунку плинності газу в контактні шорстких тіл, як це зроблено, наприклад, в [9–11]. Підстави для такого висновку наступні. Оскільки кути нахилу нерівностей реальних шорстких поверхонь складають лише декілька градусів, то висота каналу в цьому випадку набагато менша за ширину.

Розглянемо для прикладу щілинний канал еліптичної форми, що має висоту $2b$ та ширину $2a$. Площа каналу становить

$$F = \pi ab,$$

а периметр:

$$S = 4aE(\varepsilon),$$

де

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a},$$

$E(\dots)$ – повний нормальний еліптичний інтеграл Лежандра другого роду.

Оскільки $b \ll a$, то $\varepsilon \rightarrow 1$, відповідно $E(\varepsilon) \rightarrow 1$. В результаті отримуємо:

$$d_h = \pi b,$$

тобто еквівалентний гідравлічний діаметр не залежить від ширини щілинного каналу.

До аналогічного висновку можна прийти, якщо прийняти, що канал має форму прямокутника висотою $2b$ та шириною $2a$. В цьому випадку отримуємо:

$$\begin{aligned} F &= 4ab; \\ P &= 4(a+b); \\ d_h &= \frac{4ab}{a+b}. \end{aligned}$$

Оскільки $b \ll a$, то остаточно маємо:

$$d_h = 4b,$$

тобто знову ж такі приходимо до висновку, що еквівалентний гідравлічний діаметр не залежить від ширини щілинного каналу.

При визначенні еквівалентного діаметру каналу слід враховувати як його площу, так і периметр. І оскільки канал має неправильну форму, то слід очікувати, що значення еквівалентного діаметру, знайдені на підставі площі, будуть відрізнятися від значень, знайдених на підставі периметру.

Середню площу каналу F можна знайти, поділивши питомий міжконтактний об'єм V на щільність каналів δ_k :

$$F = \frac{V}{\delta_k} . \quad (17)$$

Позначимо d_F - еквівалентний діаметр каналу, знайдений на підставі його площі. Виходячи з кругової форми каналу, отримаємо:

$$d_F = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}} . \quad (18)$$

Підставивши в (18) формули (17, 12) і формулу міжконтактного об'єму, отримаємо:

$$d_F = \frac{2m_0^{1/2}}{m_2^{1/4}} \sqrt{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} + u \exp\left(\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)} , \quad (19)$$

або

$$\frac{d_F m_2^{1/4}}{m_0^{1/2}} = 2\sqrt{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} + u \exp\left(\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)} . \quad (20)$$

На підставі формул (13) і (20) за допомогою програми Durchmesser_F [7] розрахований зв'язок еквівалентного діаметру d_F з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 2.

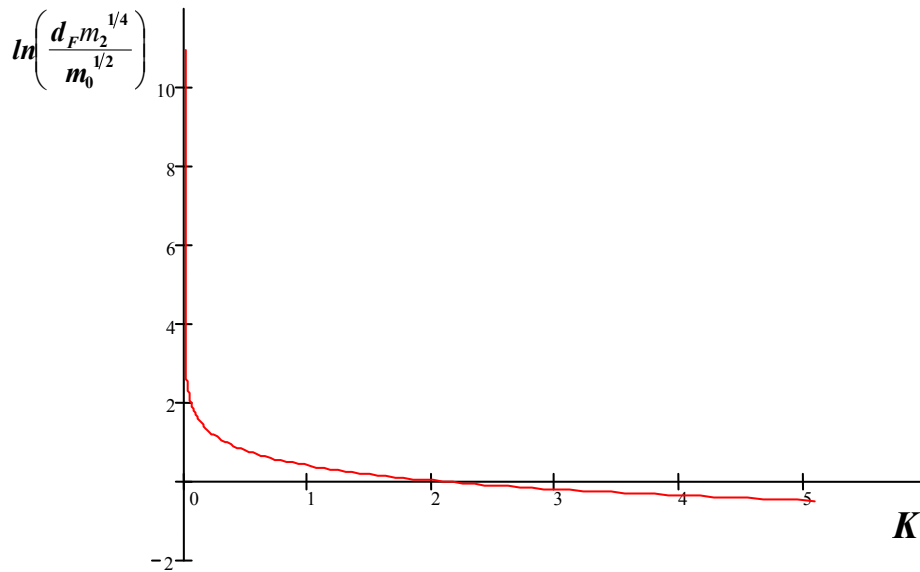


Рис. 2. Залежність еквівалентного діаметру d_F від комплексу умов контактування

Залежність, представлена на рис. 2, була апроксимована формулою:

$$\frac{d_F m_2^{1/4}}{m_0^{1/2}} = \begin{cases} \left(1 + \frac{1,328}{K^{1,08}}\right)^{0,545} , & (K \leq 1); \\ 2,524 \exp(-0,615K^{0,538}) , & (K > 1) \end{cases} \quad (21)$$

Формула (21) отримана в результаті розрахунків за програмами Appr_dF_1, Appr_dF_2 [7]. Вона якісно правильно описує поведінку еквівалентного діаметру d_F при зміні номінального навантаження, оскільки з неї випливає, що:

$$\lim_{\sigma_n \rightarrow 0} d_F = \infty; \quad \lim_{\sigma_n \rightarrow \infty} d_F = 0.$$

Периметр каналу P можна знайти, поділивши питому площу поверхні стику, що омивається середовищем S_K на щільність каналів δ_k :

$$P = \frac{S_K}{\delta_k} \quad (22)$$

Позначимо d_p — еквівалентний діаметр каналу, знайдений на підставі його периметру. Виходячи з кругової форми каналу, отримаємо:

$$d_p = \frac{P}{\pi} \quad (23)$$

Підставивши в (23) формули (22, 12), отримаємо:

$$d_p = \left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{1/2} (1+S) \exp\left(\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right), \quad (24)$$

або

$$\frac{d_p}{1+S} \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} = \exp\left(\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right). \quad (25)$$

На підставі формул (13) і (25) за допомогою програми Durchmesser_P [7] розрахований зв'язок еквівалентного діаметру d_p з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 3.

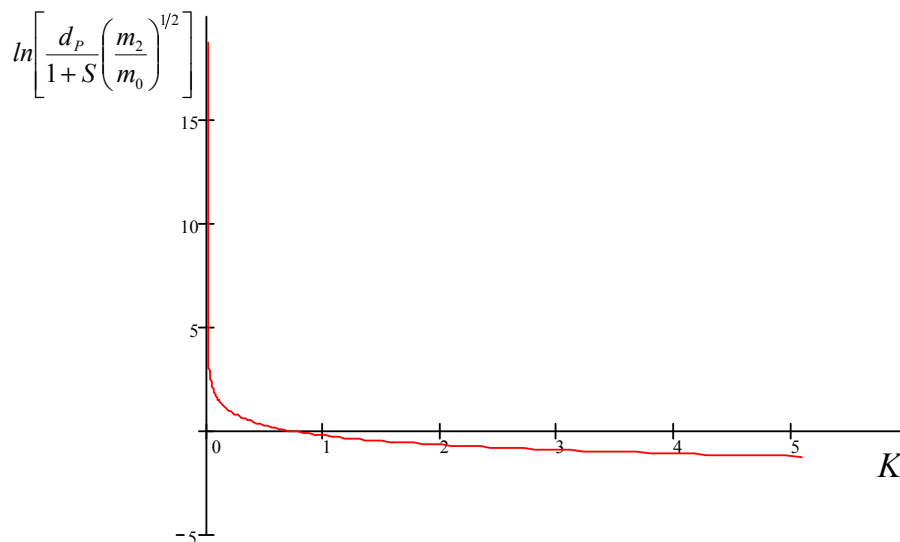


Рис. 3. Залежність еквівалентного діаметру d_p від комплексу умов контактування

Залежність, представлена на рис. 3, була апроксимована формулою:

$$\frac{d_p}{1+S} \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} = \begin{cases} \left(1 + \frac{0,321}{K^{1,09}}\right)^{0,886}, & (K \leq 0,3); \\ 2,992 \exp(-1,353K^{0,703}), & (0,3 < K \leq 1,3); \\ 1,134 \exp(-0,521K^{0,636}), & (K > 1,3) \end{cases} \quad (26)$$

Формула (26) отримана в результаті розрахунків за програмами Appr_dP_1, Appr_dP_2, Appr_dP_3 [7]. Вона якісно правильно описує поведінку еквівалентного діаметру d_p при зміні номінального навантаження, оскільки з неї випливає, що:

$$\lim_{\sigma_n \rightarrow 0} d_p = \infty; \quad \lim_{\sigma_n \rightarrow \infty} d_p = 0.$$

Оскільки значення d_F та d_p різняться внаслідок неправильної геометричної форми каналу, то за еквівалентний діаметр каналу $d_{\text{екв}}$ можна прийняти середнє значення:

$$d_{\text{екв}} = (d_F + d_p)/2 \quad (27)$$

Висновки. Для визначення щільності каналів виведена точна формула

$$\delta_k = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right),$$

де m_0, m_2 – спектральні моменти;
 u – ефективний рівень деформації.

На підставі точної формули отримана розрахункова формула:

$$\delta_k = 0,787 \left(\frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2} K^{0,733} \exp\left[-(K + 0,633)^{1,028}\right].$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою щільності каналів різняться не більше, ніж на 0,0045.

Залежність щільності каналів від комплексу умов контактування носить екстремальний характер. З ростом комплексу умов контактування щільність каналів зразу зростає, а потім зменшується. Це пояснюється впливом процесу злиття плям контакту в процесі навантаження. Максимальна кількість каналів досягається при $K = 0,69315$ і становить

$$\delta_{k, \max} = 0,15915 \left(\frac{m_2}{m_0} \right)^{1/2}.$$

Для розрахунку еквівалентного діаметру запропонована формула:

$$d_{\text{екв}} = (d_F + d_P)/2,$$

де d_F, d_P – еквівалентні діаметри каналу, знайдені відповідно на підставі його площі периметру.

Виведені точні формули еквівалентних діаметрів d_F, d_P :

$$d_F = \frac{2m_0^{1/2}}{m_2^{1/4}} \sqrt{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} + u \exp\left(\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)};$$

$$d_P = \left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{1/2} (1+S) \exp\left(\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right),$$

де m_0, m_2, m_4 – спектральні моменти.

Досліджена залежність еквівалентних діаметрів d_F, d_P від комплексу умов контактування.

На підставі точних формул отримані розрахункові формули:

$$\frac{d_F m_2^{1/4}}{m_0^{1/2}} = \begin{cases} \left(1 + \frac{1,328}{K^{1,08}}\right)^{0,545}, & (K \leq 1); \\ 2,524 \exp(-0,615 K^{0,538}), & (K > 1) \end{cases};$$

$$\frac{d_P}{1+S} \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} = \begin{cases} \left(1 + \frac{0,321}{K^{1,09}}\right)^{0,886}, & (K \leq 0,3); \\ 2,992 \exp(-1,353 K^{0,703}), & (0,3 < K \leq 1,3); \\ 1,134 \exp(-0,521 K^{0,636}), & (K > 1,3) \end{cases}.$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою зведеного еквівалентного діаметру $d_F m_2^{1/4} / m_0^{1/2}$ різняться не більше, ніж на 9%, для зведеного еквівалентного діаметру $d_P (m_2 / m_0)^{1/2} / (1+S)$ різниця не перевищує 10%.

Література

1. Бабкин В. Т. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем / Бабкин В. Т., Зайченко А. А., Александров В. В. – М. : Машиностроение, 1979. – 270 с.
2. Демкин Н.Б. Плотность стыка и объем зазора между поверхностями контактирующих деталей машин / Н.Б. Демкин // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М. : Наука, 1971. – С. 96–101.
3. Демкин Н.Б. Расчет расхода газа через зазор, образованный плоскими волнистыми и

шероховатыми поверхностями / Н.Б. Демкин, А.А. Ланков, Р.Г. Перельман, Ю.Б. Михайлов // Надежность и долговечность деталей машин. – Калинин, 1974. – С. 55–65.

4. Калда Г.С. Разработка методов расчёта контактных перемещений и герметичности металлополимерных сопряжений с помощью модели случайного поля : дис. ... канд. техн. наук / Калда Г.С. – Хмельницкий, 1989. – 184 с.

5. Semenjuk N.F. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau. – Zittau, 1991. – 160 S.

6. Бачинская Н.К. Исследование контактных характеристик шероховатых, сильно анизотропных поверхностей : дис. ... канд. техн. наук / Бачинская Н.К. – Хмельницкий, 1994. – 166 с.

7. Тимошук О.Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень : дис. ... канд. техн. наук. – Хмельницький, 2003. – 386 с.

8. Макушкин А.П. Научно-технические основы создания полимерных уплотнений и узлов трения оборудования криогенных систем : дис. ... д-ра техн. наук / Макушкин А.П. – Балашиха, 1982. – 511 с.

9. Лившиц В.И. Теоретическое исследование герметичности при контакте стальных шлифованных поверхностей / В.И. Лившиц, А.Д. Домашнев // Вопросы прочности сосудов высокого давления. – № 261. – С. 103–116. – (Деп. в ЦИНТИ Химнефтемаш 16.10.75).

10. Макушкин А.П. Исследование герметичности разъемных соединений при криогенных температурах / А.П. Макушкин, И.В. Крагельский, Н.М. Михин // Трение и износ. – 1988. – № 2. – С. 197–206.

References

1. Babkin V.T., Zaichenko A.A., Aleksandrov V.V. The Hermeticity of Immobile Joints of Hydraulic-Visual Systems. - Moscow: Mechanical Engineering, 1979. - 270 p.

2. Demkin N.B. The joint density and gap volume between the surfaces of the contacting parts of ma-tires // Contact interaction of solids and calculation of friction and wear forces. - Moscow: Nauka, 1971. - P. 96 - 101.

3. Demkin N.B., Lankov A.A., Perelman R.G., Mikhailov Yu.B. Calculation of gas flow through a gap formed by flat wavy and rough surfaces // Reliability and durability of machine parts. - Kalinin, 1974. - P. 55 - 65.

4. Calda G.S. Development of methods for calculating contact displacements and tightness of metal-dimensional interfaces using a random field model: Dis. ... cand. tech. sciences. - Khmel'nitsky, 1989. - 184 p.

5. Semenjuk N.F. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau. - Zittau, 1991. - 160 S.

6. Bachinskaya N.K. Investigation of contact characteristics of rough, highly anisotropic surfaces: Dis ... kand. ... cand. tech. sciences. - Khmel'nitsky, 1994. - 166 p.

7. Tymoshchuk O.G. Development of calculation methods and experimental study of tightness of non-greasy cylinder-piston seals: Dis. ... Candidate tech sciences - Khmel'nitsky, 2003. - 386 p.

8. Makushkin A.P. Scientific and technical fundamentals of creating polymeric seals and friction units of cryogenic systems equipment: Dis ... Dr. techn. sciences. - Balashikha, 1982. - 511 p.

9. Livshits V.I., Domashnev A.D. Theoretical investigation of the tightness at the contact of steel polished surfaces // In: Problems of the strength of high-pressure vessels. Dep. in CINTI Chemneftemash on 16.10.75. - No. 261. - P. 103 - 116.

10. Makushkin A.P., Kragelsky I.V., Mikhin N.M. Investigation of the tightness of detachable joints at cryogenic temperatures // Friction and wear. - 1988. - №2. - P. 197 - 206.

Рецензія/Peer review : 18.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Кармаліта А.К.

УДК 675.02

О.А. АНДРЕЄВА, О.А. ОХМАТ

Київський національний університет технологій та дизайну

О.Р. МОКРОУСОВА

Київський національний торговельно-економічний університет

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ШКІР

Проведено комплексний аналіз впливу шкіряного виробництва на навколишнє середовище та здоров'я людини. Встановлено негативний вплив сполук хрому, які використовують під час дублення шкір. Показано, що інноваційним напрямом екологізації виробництва шкір та формування безпечності шкір є часткова заміна сполук хрому сполуками, які проявляють дубильну дію. При цьому використання монтморилоніту є ефективним способом підвищення екологічної безпеки виробництва та формування показників безпечності шкіряних матеріалів.

Ключові слова: шкіра, екологічність, навколишнє середовище, сполуки хрому, відходи, стічні води, монтморилоніт, етапи життєвого циклу.

O.A. ANDREYEVA, O.A. OKHMAT

Kyiv National University of Technology and Design

O.R. MOKROUSOVA

Kyiv National University of Trade and Economics

INNOVATIVE WAYS TO IMPROVE THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF TANNERIES

The work presented comprehensive analysis of the main innovative directions for improving the environmental friendliness of leather production and reducing the eco-destructive effects on the environment. Technologies of leather production with partial or complete replacement of chromium compounds during tanning were analysed. Eco-destructive effects of leather production on the environment and human health were identified. The use of a large amount of multi-functional chemical materials and their low efficiency during usage leads to the formation of significant amounts of wastewater and solid waste. The main approaches were formulated for reduction of the harmful role of chromium compounds on the environment. The innovative directions of ecologization of leather production are presented, which involve full or partial replacement of chromium compounds in the leather manufacture or are aimed at increasing the efficiency of the use of chromium compounds. The expediency of application of montmorillonite dispersions at different technological stages of skin production is shown. At the same time there is an improvement in the condition of leather enterprises sewage and an increase of environmental friendliness of production. The improvement of the absorption efficiency of chromium compounds is due to the presence of montmorillonite, which has a highly developed surface adsorption and intensifies the binding of chromium compounds in the dermis structure. The use of montmorillonite dispersions contributes to a reduction in the content of unused chromium oxide (III). The content of chromium compounds in wastewater decreases and the ecological situation in the leather production is improved.

Key words: leather, environmental friendliness, environment, chromium compounds, waste, sewage, montmorillonite, stages of the life cycle.

Вступ

Актуальні підходи забезпечення екологічності шкіряного виробництва ґрунтуються на заподіянні мінімальних ризиків негативного впливу на людину та довкілля на різних стадіях життєвого циклу шкір: від виробництва до експлуатації та утилізації. Кожна стадія життєвого циклу в тій чи іншій мірі впливає на навколишнє середовище, а саме, воду, ґрунт, природні ресурси, людину, зв'язок між ними, тощо, і таким чином, обумовлює екологічний аспект, як елемент взаємодії довкілля і самої продукції.

Для ефективного управління питаннями екологічності виробництва необхідно виявляти та ідентифікувати притаманні даній продукції екологічні аспекти, причинно-наслідкові зв'язки між окремими екологічними змінами довкілля.

Запровадження екологічно спрямованих заходів у виробництві шкір повинно враховувати факт утворення побічних продуктів: відходів, викидів в атмосферу, забруднення ґрунту, води тощо, а також фізичні явища – шум, вібрацію, електромагнітне, іонізуюче або інші види випромінювання тощо. В зв'язку з цим актуальним вирішенням питання підвищення екологічності шкіряного виробництва є комплексний підхід, який ґрунтується на запровадженні дій щодо економного та раціонального використання природних ресурсів, застосування екологічно безпечних матеріалів або виключення з технологічного процесу небезпечних хімічних матеріалів і речовин, застосування сучасного обладнання (енергоефективного, високо продуктивного, з мінімальними шумовими, вібраційними тощо характеристиками), впровадження ресурсозбережних, екологічно орієнтованих, безвідходних, енергоощадних або інших видів технологій, а також розробка технологій повторного використання у технологічному циклі відходів, побічних продуктів виробництва або стічних вод.

Постановка завдання дослідження

Екологічні аспекти протягом останніх років є визначальними для вдосконалення і розробки нових сучасних технологічних процесів шкіряного виробництва [1]. При цьому питання екологічності виробництва натуральних шкір мають дві основні складові [2–7], які включають вплив на навколишнє середовище самого

шкіряного виробництва та вплив шкіряних виробів на екологію людини.

З точки зору впливу на навколишнє середовище, виробництво може виснажувати ресурси; руйнувати озоновий шар; забруднювати повітря, водойми, ґрунт; змінювати клімат, рельєф, екологічні характеристики території [8, 9].

Під впливом токсичних факторів в екологічних системах проявляються несприятливі ефекти на різних рівнях організації: від молекулярно-генетичного до біоценологічного. Спостерігаються ефекти збільшення хромосомних порушень та мутацій, зміни ферментативної активності окремих систем організму, зниження репродуктивної можливості та тривалості життя організмів, зміни статевої та вікової структури популяції, зміни видового складу співтовариств, зміни домінуючих видів, зміни продуктивності біоценозу в цілому [10].

Найбільшу потенційну небезпеку для навколишнього середовища представляють такі забруднювачі як нафта та важкі метали: ртуть, свинець, кадмій, мідь, цинк, хром. Важкі метали, потрапляючи у водойми зі стічними водами промислових підприємств, викликають незворотні зміни природних екосистем [11–14].

Досить сказати, що для важких металів в принципі не існує механізмів самоочищення. Вони лише переміщуються з одного природного резервуара в інший, взаємодіючи з різними групами живих організмів [15]. Ніканоров А. М. і Жулідов А. В. [11] відзначали, що важкі метали не піддаються трансформації, як це властиво органічним сполукам, і в біогеохімічному циклі залишаються. В результаті цих властивостей металів і внаслідок безконтрольного забруднення водного середовища відбуваються масові отруєння людей і загибель організмів.

Біологічні та екологічні наслідки таких аномалій не можуть не привертати пильної уваги. На відміну від інших забруднюючих речовин, метали в природних умовах не руйнуються, а змінюють форму знаходження та фізико-хімічні стану [12–14]. Вплив восьми металів (в тому числі, і хрому) виділено Агентством з охорони навколишнього середовища як пріоритетний. Хром став в останні десять років одним з основних факторів, що визначають антропогенний фон забруднення біосфери [12–14].

Сполуки хрому сьогодні широко використовуються в шкіряному виробництві [9]. Дж.В. Мур і С. Рамамурті [15] віднесли сполуки хрому до найбільш небезпечних забруднюючих речовин водного середовища. Відмічено, що забруднення навколишнього середовища сполуками хрому потенційно небезпечно для людини та інших біологічних видів. А кількість сполук хрому в навколишньому середовищі все зростає і досягає рівня, небезпечного для життєдіяльності організмів.

Не зважаючи на все перераховане, незмінне протягом багатьох років використання виробниками натуральної шкіри дубильних солей хрому пов'язано з простотою технології дублення, надійністю процесу, високими експлуатаційними і технологічними властивостями шкір хромового дублення, а також можливістю виробництва товарів різного асортименту.

Отже, для зменшення екологічного навантаження на довкілля доцільно зосередити наукові зусилля на повну або часткову заміну хромового дублення, що дозволить підвищити екологічність шкіряного виробництва [16].

Метою роботи є комплексний аналіз основних інноваційних напрямів підвищення екологічності шкіряного виробництва для обґрунтування зменшення екодеструктивного впливу на довкілля.

Матеріали та методи. Об'єкт дослідження – технології шкіряного виробництва з використанням екологічно спрямованих підходів часткової або повної заміни сполук хрому під час дублення та застосування природних глинистих мінералів.

Використано загальнонаукові та спеціальні методи: аналізу та синтезу, системного підходу, порівняння та узагальнення.

Результати дослідження

Для розробки інноваційних підходів управління екологічністю необхідно знати і розуміти принципи схеми виробництва натуральних шкір; характеристику технологічних процесів; характеристику хімічних матеріалів і речовин, що застосовуються в технологічному процесі; шкідливість і граничні допустимі концентрації для хімічних речовин, що використовуються в технологічному процесі; стан стічних вод виробництва; характеристику відходів тощо.

Проблеми, що виникають з очищенням стічних вод шкіряних підприємств безпосередньо пов'язані з недостатнім рівнем технологій і невисоким, за сучасними мірками, ступенем використання хімічних сполук, що застосовуються для виробництва шкір. Щодо другої складової, то значна частина шкіряних матеріалів використовуються у виробництві товарів, які під час експлуатації безпосередньо (I категорія) або через проміжний шар (II категорія) контактують з поверхнею тіла людини, наприклад, взуття, рукавички, головні убори, ремінці для годинників тощо. В зв'язку з цим шкіри повинні бути безпечними для здоров'я людини і не створювати небезпеку функціонуванню організму, особливо при ходьбі, активному русі або в широкому температурному інтервалі [3, 4].

По кількості відходів, які можуть забруднювати навколишнє середовище, шкіряне виробництво займає одне з перших місць після будівництва, виробництва виробів із пластмас та побутової життєдіяльності [5–7].

На переробку 1 тони сировини галузь витрачає 80 м³ води, стільки ж забруднених стоків потрапляє в каналізацію шкіряних заводів. Для новітніх ресурсощадних технологій витрати води знижено до 10–30 м³ [17].

В процесі виробництва натуральної шкіри тільки близько 50 % маси сировини переходить безпосередньо в шкіру, решта – побічні продукти та відходи виробництва.

Для дублення використовуються хімічні матеріали, які мають негативний вплив як на здоров'я людини так і на екологію довкілля. Особливо небезпечними в цьому відношенні є сполуки хрому, хоча хром в шкіряному виробництві застосовується тільки в найбільш безпечній і стабільній формі – у вигляді сполук хрому з валентністю III. Слід відзначити, що близько 90 % шкіри в світі виготовляється з використанням згаданих сполук хрому. Вони застосовуються в шкіряній промисловості понад 100 років через те, що є найбільш доступною, порівняно дешевою, універсальною та ефективною дубильною речовиною [18].

В традиційних технологіях виробництва натуральної шкіри [19] ефективність використання сполук хрому не перевищує 80 %, а це означає, що до 20 % оксиду хрому, який використовується під час дублення, залишається у відпрацьованих розчинах. На практиці підприємства не в змозі забезпечити необхідну ступінь очистки відпрацьованих розчинів і значна кількість сполук хрому потрапляє в стічні води [18].

Разом із відпрацьованими розчинами на заводах зростають об'єми твердих хромвміщуючих відходів, отриманих в результаті проведення механічної операції стругання, що сприяє вирівнюванню товщини шкіри по площі. Накопичування твердих відходів, що містять дубильні сполуки хрому, характерне для кожного шкіряного заводу не зважаючи на його національну приналежність.

Для обмеження використання та вмісту сполук хрому, відповідно згаданому вище «Керівництву з охорони навколишнього середовища», необхідні наступні заходи:

1. Використання альтернативних агентів дублення замість хрому або в комбінації з ним;
2. Відмова від використання шестивалентного хрому;
3. Повторне використання відпрацьованих розчинів після хромування (хромового дублення з використанням обмеженої кількості солей хрому);
4. Уникнення використання хрому, оскільки він може сорбуватися на поверхні органічних речовин різних розмірів і не випадати в осад;
5. Відмова від знищення шламів хромового дублення за допомогою спалювання, оскільки в лужному середовищі в присутності надлишку кисню можливий перехід трихвалентного хрому в більш токсичну форму – шестивалентний хром.

Аналіз статистичних даних свідчить, що шкіряна промисловість щорічно використовує 65 тис. тонн сполук хрому. За даними BLMRA (British Leather Manufacturers Research Association) з цієї кількості тільки 20 тис. тонн переходить в готові шкіри, інша частина – це відходи, серед яких 25 тис. тонн зливається з відпрацьованими рідинами. Потрапляючи після очищення у природні водойми, сполуки хрому викликають незворотні зміни в організмах тварин і рослин, впливаючи, таким чином, на біосферу і людини. В екологічному стандарті ЕКО-ТЕХ-100 допустимий вміст сполук хрому (III) в текстильних виробках, що контактують з шкірою людини, не повинно перевищувати 2,0 мг / кг (для дитячих товарів – 1,0 мг / кг), а в хромової шкірі, за традиційною технологією, вміст сполук хрому становить 7,3 мг / кг. Токсична дія сполуки хрому може проявлятися в різних алергічних реакціях, погіршенні обміну речовин, серцево-судинних функцій, зміни стану печінки, нирок тощо [20, 21].

Хром є необхідним елементом, що приймає участь у метаболізмі та обміні речовин у людини. Він включається в периферійну дію інсуліну, утилізацію глюкози, стимуляцію ферментних систем і можливо, приймає участь в стабілізації нуклеїнових кислот. Він також є кофактором при утворенні інсуліну. Доросла людина споживає за добу 52-78 мкг хрому [22].

Незважаючи на біологічну потребу в хромі, його високі концентрації токсичні. Можна виділити такі види негативного впливу хрому на організм людини (рис. 1).

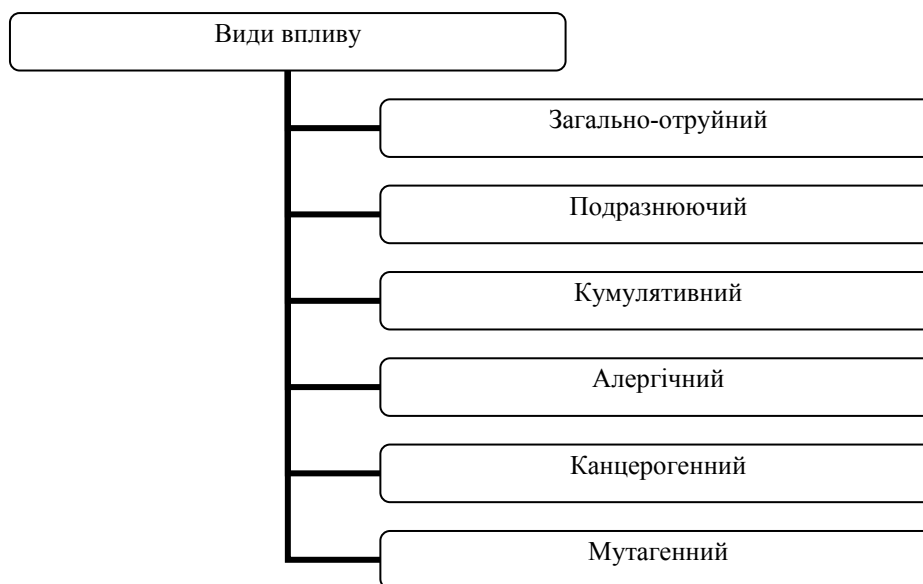


Рис. 1. Види негативного впливу хрому на людину

Враховуючи, що сполуки Cr (VI) віднесені до 1 класу небезпеки, а сполуки Cr (III) – до 3 класу [23], встановлені гранично допустимі концентрації до вмісту відповідних сполук в складі біосфери (табл.).

Таблиця 1

Вимоги до вміст хрому в складових біосфери

Вміст хрому за валентністю	ГДК в складі біосфери			
	Повітря		Вода	Ґрунт
	атмосферне	робочої зони		
Cr (III)	0,025 мг/м ³	1,0 мг/м ³	0,5 мг/л	–
Cr (VI)	0,0015 мг/м ³	0,01 мг/м ³	0,05 мг/л	0,005 мг/кг

При кількості хрому в повітрі вище 0,025 мг/м³ виникають глибокі ураження дихальної системи, спостерігається зниження адаптації у темряві і чутливості рогівки очей, ураження шлунково-кишкового тракту, розвиток виразкових захворювань. Особливо токсичний шестивалентний хром може викликати серйозні ураження центральної нервової системи.

Епідеміологічні та експериментальні дані щодо канцерогенності хроматів різняться, однак є дані про підвищену кількість захворюваності на рак у осіб, що контактують з хромом на виробництві [24].

Для зменшення екологічного навантаження на довкілля хромового дублення існують три базові підходи вирішення цієї проблеми [16].

Перший стосується раціонального використання хромових технологій, що дозволить зменшити витрати сполук хрому в процесі дублення. Підхід може бути реалізований шляхом корегування параметрів технологічних процесів (витрат солей хрому для дублення, рівня рН, температури тощо), а також шляхом використання допоміжних речовин, наприклад маскувальних агентів (мурашиної та фталевої кислот, форміату натрію) і речовин, що сприяють максимальній фіксації хрому білком (наприклад, оксид магнію та його похідні).

Другий підхід стосується використання хромозберігаючих технологій комбінованого дублення, які передбачають часткову заміну сполук хрому альтернативними дубителями, наприклад сполуками алюмінію (III), цирконію (IV), рослинними та синтетичними дубителями, альдегідами тощо.

Третій підхід – розробка і впровадження технологій безхромового дублення [25].

Найкращою альтернативою сьогодні була б реалізація третього підходу – повна заміна сполук хрому солями інших металів або органічними сполуками, що проявляють дубильну дію. Але на жаль вказані сполуки, маючи дубильну дію, не можуть забезпечити високу гідротермічну стійкість шкіри.

Отже, основні наукові дослідження в шкіряній галузі сьогодні ведуться у напрямку впровадження ресурсозбережних, екологічно орієнтованих, маловідходних, енергоощадних або інших видів технологій з повторним використанням побічних продуктів виробництва або стічних вод.

Альтернативними екологічно оощадними на сьогодні технологіями є:

- технологія комбінованого дублення, яке виконують кількома різними дубильними речовинами одночасно або в певній послідовності, наприклад сполуками хрому і рослинними дубителями (хромтанідне дублення), або солями хрому і сполуками цирконію, алюмінію, титану [26].
- застосування похідних малеїнової кислоти перед проведенням хромового дублення [27], що дає можливість знизити витрати хромового дубителя на 25 %, а ступінь вибирання його з розчину підвищити на 28 % у порівнянні з типовими технологіями.
- безхромові технології дублення голини великої рогатої худоби для отримання шкір, в тому числі ортопедичних [26];
- технології з мінімізованою витратою сполук хрому під час дублення для отримання напівфабрикату шкір для верху взуття [28];
- екологічно безпечна технологія безхромового дублення шкіряного напівфабрикату основним карбонатом цирконію [29] тощо.

Незначне застосування вітчизняними виробниками шкіри вищенаведених технологій сьогодні пов'язано не з небажанням міняти відпрацьовані технологічні схеми, а з обмеженістю вітчизняної сировинної бази перелічених хімічних матеріалів. Тому цікавим на сьогодні є напрям використання у виробництві шкір природних глинистих мінералів. Перспективність цього напрямку зумовлена екологічністю і властивостями самих природних мінералів, що володіють поліфункціональними властивостями.

Глинисті мінерали – група мінералів, головним чином шаруватих силікатів, що входять до складу глини як основна їх складова [30].

В Україні багато родовищ з багатомільйонними запасами різних мінералів. Це, насамперед, монтморилоніти і їх різновиди; слюдисті матеріали; піщані матеріали; моноклінічні породи. Дисперсність кристалів глинистих мінералів – це той критерій, який визначає їх основні фізико – хімічні властивості, пов'язані з ефективною поверхнею кристалів.

На сьогоднішній день у процесах виробництва натуральних шкір використовують наступні глинисті мінерали: каолін, цеоліт, бентоніт.

Найперспективнішим з мінералів на сьогодні є бентоніт, з основною складовою – монтморилонітом [30]. Бентоніти, як і будь-які глини, є трикомпонентною системою, що складається з мінерального скелета,

води і повітря. Мінеральні частинки бентонітів займають лише частину об'єму (55 – 68 %), решту об'єму складають пори, заповнені водою, і невелика кількість (2 %) повітря. Питома поверхня монтморилоніту виключно велика: вона становить зазвичай 700 – 840 м²/г. При цьому питома поверхня зовнішніх граней кристалів дорівнює 50 – 120 м²/г, інша ж поверхня формується за рахунок внутрішньо кристалічних площин, доступних для змочування водою або іншими полярними рідинами. Наявність такої великої активної поверхні призводить до появи різноманітних зв'язків між активними групами білка та хімічних матеріалів композиції.

Сучасні дослідження китайський вчених [31] встановили можливість застосування дисперсій монтморилоніту на різних технологічних стадіях виробництва шкіри і довели підвищення фізико-механічних показників готових шкір, покращення стану стічних вод шкіряних підприємств та підвищення екологічності виробництва, що є перспективним напрямом застосування монтморилоніту для обробки шкір.

Китайськими вченими підтверджена ефективність обробки хромового напівфабрикату наноконпозиційними матеріалами [32], що включають монтморилоніт, який модифіковано сполуками натрію та синтезованим в його присутності акриловим сополімером на базі мономерів: акрилової кислоти та акрилового альдегіду. В результаті суміщеного дублення напівфабрикату наноконполитом та основним сульфатом хрому (витрати 0,5 % Cr₂O₃) встановлено підвищення виходу дослідних шкір за товщиною, межею міцності при розтягуванні, зменшення еластичного видовження при фіксованому навантаженні. Гідротермічна стійкість та фізико-механічні показники для шкіри, що видублена з витратою наноконполиту на рівні 6,0 % та 0,5 % хромового дубителя в перерахунку на Cr₂O₃, дещо поступаються шкірам, що отримані з вищими до 2,0 % Cr₂O₃ витратами сполук хрому. Однак встановлено, що поглинання сполук хрому в присутності наноконполитів підвищується [33].

Автори також відмічають [33] переваги дублення шкір наноконполитом порівняно з обробкою голини акриловим полімером суміщено з хромовим дубителем практично за всіма експлуатаційними показниками. Автори доводять, що використання наноконполиту активізує утворення в структурі колагену міцних місткових зв'язків дубильними сполуками хрому і це проявляється в підвищенні температури зварювання шкіри на 17 °С порівняно зі зразками типового хромового дублення.

Обробка голини отриманими композиціями та аналіз експлуатаційних показників отриманих шкір дозволили авторам [33] зробити висновок про можливість успішного застосування розроблених композицій для отримання високоякісної шкіри з урахуванням суттєвого зменшення витрат хромового дубителя (на 75 %) у порівнянні з дубленням хромовими сполуками.

Сучасними технологіями передбачено застосування дисперсій монтморилоніту для післядубильних процесів, в якості технологічно та екологічно ефективних матеріалів для удосконалення процесу формування структури дерми і властивостей готової шкіри [34].

Додублювання шкіряного напівфабрикату органічно-мінеральним складом на основі монтморилоніту і лігносульфонату натрію сприяє зменшенню витрат рослинних дубителів та синтанів для обробки шкір і покращує ефективність формування структури дерми, що підтверджується показниками площі, товщини, об'ємного виходу і температурою зварювання [34].

Інноваційним напрямом екологізації шкіряного виробництва є застосування модифіковано монтморилоніту суміщено з дубленням хромовими сполуками [35]. При цьому забезпечується часткова заміна сполук хрому на дубленні при зменшенні на 16,7 % витрат хромового дубителя. За даним способом хромового дублення спостерігається підвищення ступеня відпрацювання робочих рідин на 14 %, інтенсифікується зв'язування сполук хрому в структурі дерми на 40 %, при цьому стабілізація структури дерми досягається комплексною взаємодією в системі «колаген – хромовий дубитель – монтморилоніт», що доведено зростанням виходу площі та товщини шкір на 4,9 % та 3,5 % відповідно. Підвищення ефективності поглинання сполук хрому обумовлено присутністю монтморилоніту, який має високорозвинену адсорбційну поверхню та інтенсифікує зв'язування сполук хрому в структурі дерми.

З екологічної точки зору, використання дисперсій монтморилоніту сприяє різкому зниженню вмісту невикористаного оксиду хрому (III), який потрапляє в стічні води шкіряних підприємств, чим покращується екологічна ситуація на виробництві та підвищується рівень безпечності готових шкір.

Отже, використання матеріалів на основі монтморилоніту є ефективним та інноваційним напрямом екологізації шкіряного виробництва, що також передбачає впровадження маловідходних та екологічно чистих технологій виробництва шкіри.

Література

1. Мокроусова О. Р. Екологічно безпечні матеріали для шкіряного виробництва / О. Р. Мокроусова, О. В. Ковтуненко, Е. Є. Касьян // Екологічна безпека. – 2012. – № 2. – С. 93–97.
2. Переробка відходів шкіряно-хутрового виробництва : конспект лекцій за спеціальністю «Технології обробки шкіри та хутра» / упор. Г. В. Цеменко. – К. : КНУТД, 2012. – 52 с.
3. Екологічно орієнтовані технології виробництва шкіряних та хутрових матеріалів для створення конкурентоспроможних товарів : монографія : в 2 ч. Ч. 1 // Екологічно орієнтовані технології виробництва шкіряних та хутрових матеріалів / А. Г. Данилкович, В. І. Ліщук, В. П. Плавач, Е. Є. Касьян, О. Г. Жигочський ; за ред. А. Г. Данилковича. – К. : Фенікс, 2011. – 438 с.

4. Карпухина Л. И. Переработка отходов кожевенно-обувного производства: справочник / Л. И. Карпухина, А. В. Пономарева, Р. И. Чайковский. – К. : Техника, 1983. – 85 с.
5. Андреева О. А. Товарознавство шкіряно-хутрової сировини : навч. посіб. / О. А. Андреева, Г. В. Цеменко. – К. : Кондор, 2012. – 359 с.
6. Рекомендації по створенню екологічно-безпечних умов виробництва підприємств легкої та текстильної промисловості України у басейні р. Дніпро. – К. : КДУТД, 1999. – 141 с.
7. Фридлянд А. А. Дополнительная продукция из отходов кожевенного и мехового производства / А. А. Фридлянд, Г. Н. Никитин. – М. : Легкая индустрия, 1965. – 212 с.
8. Плаван В. П. Пути повышения экологичности процесса дубления кож / В. П. Плаван, А. Г. Данилкович, М. С. Павлова. // Экотехнологии и ресурсозбережение. – 2007. – № 3. – С. 52–56.
9. Павлова М. С. Экологический аспект химической технологии кожи / М. С. Павлова. – М. : ИТЭ Радом, 1997. – 191 с.
10. Курляндский Б. А. Общая токсикология / Б. А. Курляндский, В. А. Филова. – М. : Медицина, 2002. – 547 с.
11. Грушко Я. М. Ядовитые металлы и их неорганические соединения в промышленных сточных водах / Я. М. Грушко. – М. : Медицина, 1972. – С. 138–145.
12. Патин С. А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана / С. А. Патин. – М. : Пищепромиздат, 1979. – С. 172.
13. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеоздат, 1984. – С. 289.
14. Renhwoldt R. The acute toxicity of some heavy metal ions toward benthic organisms / R. Renhwoldt, L. Lacko // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 1973. – Vol. 10. – P. 291–294.
15. Мур Дж. В. Хром. Химические свойства. Тяжелые металлы в природных водах / Дж. В. Мур, С. Рамамурти. – М.: Мир, 1987. – С. 72–87.
16. Cavington A. New tannages for the New Millennium / A. Cavington // JALCA. – 1989. – Vol. 93. – P. 168–183.
17. Buljan J. Mass balance in leather processing [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.unido.org/sites/default/files/2009-05/Mass_balance_in_leather_processing_0.pdf.
18. Senior K. Chromium in the leather industry / K. Senior // World leather. – № 7. – 2000. – P. 51–55.
19. Данилкович А. Г. Технологія і обладнання шкіряно-хутрового виробництва : навч. посіб. / А. Г. Данилкович, В. І. Ліщук. – К. : Фенікс, 2007. – 312 с.
20. Паламарь В. А. Пути повышения безопасности натуральных кож / В. А. Паламарь, О. Р. Мокроусова, О. А. Охмат // Материалы X международной научно-практической конференции [«Кожа и мех в XXI веке: технология, качество, экология, образование»], (Улан-Уде, Россия, 25-30 августа 2014). – Улан-Уде : Изд-во ВСГУТУ, 2015. – С. 80–86.
21. Потебенько О. А. Шляхи підвищення екологічності процесу хромового дублення у виробництві натуральної шкіри / О. А. Потебенько, О. А. Охмат, В. А. Паламар // Науковий Вісник Мукачівського державного університету. – 2016. – № 21(16). – С. 32–37.
22. Смоляр В. И. Рациональное питание / В. И. Смоляр. – К. : Наукова думка, 1991. – 368 с.
23. Шкідливі хімічні речовини Неорганічні з'єднання V-VIII груп: довідкове видання / [Бандман А. Л., Гудзовський Г. А., Дубейковська Л. С. та ін.]; під ред. В. А. Філова. – Львів : Хімія, 1989. – 592 с.
24. Hertel R. F. Sources of exposure and biological effects of chromium / R. F. Hertel // Environmental carcinogens selected methods of analysis. – 1986. – Vol. 8. – P. 63–77.
25. Zauns R. An alternative approach to traditional chrome tanning / R. Zauns, P. Kuhm // JALCA. – 1995. – Vol. 90. – P. 177–200.
26. Плаван В. П. Наукові основи технологій органічно-мінерального дублення для виробництва шкіри та хутра з поліпшеними властивостями : автореф. дис. на здобуття наук, ступеня докт. техн. наук : спец. 05.18.18 «Технологія взуття, шкіряних виробів і хутра» / В. П. Плаван. – К. : КНУТД, 2011. – 41 с.
27. Майстренко Л. А. Дослідження процесу хромового дублення із застосуванням полімерного матеріалу – похідної малеїнової кислоти / Л. А. Майстренко, О. А. Андреева, М. К. Коляда // Вісник КНУТД. – № 4. – 2013. – С. 1–11.
28. Патент 15534 Україна. № u200511472. Спосіб вироблення шкіряного напівфабрикату [Електронний ресурс]. – заяв. 02.12.2005 ; опубл. 17.07.2006, бюл. № 7. – Режим доступу : <http://uapatents.com/3-15534-sposib-viroblennya-shkiryanogo-napivfabrikatu.html>
29. Патент 2125096 Российская Федерация. № 97121279/12. Минеральный дубитель на основе соединений циркония. – заявл. 02.12.1997 ; опубл. 20.01.1999, Бюл. № 2. – 6 с.
30. Тарасевич Ю. И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов / Ю. И. Тарасевич. – К. : Наукова думка, 1988. – 248 с.
31. Zhao Y. T. Chinese developments in chrome-free and low-chrome tanning materials / Y. T. Zhao, X. C. Wang // JSLTC. – 2007. – Vol. 91. – P. 246–251.
32. Chen Y. Nanotechnologies for leather manufacturing: A review / Y. Chen, Fan and Bi Shi // JALCA. – 2011. – Vol. 106. – P. 261–273.
33. Bao Y. Preparation of acrylic resin/montmorillonite nanocomposite for leather tanning agent / Y. Bao, J. Ma, Y. L. Wang // JALCA. – 2009. – Vol. 104, Issue 10. – P. 352–358.

34. Грищенко І. М. Поліфункціональні шкіряні матеріали: монографія / І. М. Грищенко, А. Г. Данилкович, О. Р. Мокроусова. – Київ : Фенікс, 2013. – 268 с.

35. Паламар В. А. Формування безпечності натуральних шкір з використанням монтморилоніту : автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : спец. 05.18.08 «Товарознавство непродовольчих товарів» / В. А. Паламар. – К. : КНТЕУ, 2018. – 22 с.

References

1. Mokrousova O. R. Ekologhichno bezpechni materialy dlja shkirjanogho vyrobnyctva / O. R. Mokrousova, O. V. Kovtunenka, E. Je. Kasjian // Ekologhichna bezpeka. – 2012. – 2. – S. 93-97.
2. Pererobka vidkhodiv shkirjano-khutrovogho vyrobnyctva: konspekt lekciy za specialnistju «Tekhnologhiji obrobky shkiry ta khutra» / upor. Gh. V. Cemenko. – K. : KNUUD, 2012. – 52 s.
3. Ekologhichno orijentovani tekhnologhiji vyrobnyctva shkirjanykh ta khutrovyykh materialiv dlja stvorennja konkurentospromozhnykh tovariv: monografija: v 2 ch. Ch. 1 / Ekologhichno orijentovani tekhnologhiji vyrobnyctva shkirjanykh ta khutrovyykh materialiv / Danylkovych A. Gh., Lishhuk V. I., Plavan V. P., Kasjian E. Je., Zhyghocjkyj O. Gh. ; za red. A. Gh. Danylkovycha. – K. : Feniks, 2011. – 438 s.
4. Karpukhyna L. Y. Pererobka otkhodov kozhevenno-obuvnogho proyzvodstva: spravochnyk / L. Y. Karpukhyna, A. V. Ponomareva, R. Y. Chajkovskij. – K. : Tekhnika, 1983. – 85 s.
5. Andrejeva O. A. Tovaroznavstvo shkirjano-khutrovoji syrovyny : navch. posib. / O. A. Andrejeva, Gh. V. Cemenko. – K. : Kondor, 2012. – 359 s.
6. Rekomendaciji po stvorennju ekologhichno-bezpechnykh umov vyrobnyctva pidprijemstv legkoho ta tekstylnoji promyslovosti Ukrainy u basejni r. Dnipro. – K. : KDUTD, 1999. – 141 s.
7. Frydljand A. A. Dopolnytel'naja produkcija yz otkhodov kozhevennogho y mekhovogho proyzvodstva / A. A. Frydljand, Gh. N. Nykytyn. – M. : Leghka yndustryja, 1965. – 212 s.
8. Plavan V. P. Puty povyshenja ekologhichnosti processa dublennja kozh / Plavan V. P., Danylkovych A. Gh., Pavlova M. S. // Ekotekhnologhyy y resursozberezenje. – 2007. – 3. – S. 52-56.
9. Pavlova M. S. Ekologhicheskij aspekt khymycheskoj tekhnologhyy kozhy / M. S. Pavlova. – M. : YTE Radom, 1997. – 191 s.
10. Kurljandskij B. A. Obshhaja toksykologhija / B. A. Kurljandskij, V. A. Fylova. – M. : Medycyna, 2002. – 547 s.
11. Ghrushko Ja. M. Jadovyte metally y ykh neorghanycheskye soedynenja v promyshlennykh stochnykh vodakh / Ja. M. Ghrushko. – M. : Medycyna, 1972. – S.138-145.
12. Patyn S. A. Vlyjanye zaghrjaznenja na byologhicheskye resursy y produktyvnostj myrovogho okeana / Patyn S. A. – M. : Pyshepromyzdat, 1979. – S. 172.
13. Yzraelj Ju. A. kologhija y kontrolj sostojanija pryrodnoj sredy / Ju. A. Yzraelj. – M. : Ghydrometeoyzdat, 1984. – S. 289.
14. Renhwoldt R. The acute toxicity of some heavy metal ions toward benthic organisms / R. Renhwoldt, L. Lacko // Billetin of Environmental Contaminatio and Toxicology. – 1973. – Vol. 10. – P. 291-294.
15. Mur Dzh. V. Khrom. Khymycheskye svojstva. Tjazhelye metally v pryrodnykh vodakh / Dzh. V. Mur, S. Ramamurty. – M.: Myr, 1987. – S. 72-87.
16. Cavington A. New tannages for the New Millenium / A. Cavington // JALCA. – 1989. – Vol. 93. – P. 168-183.
17. Buljan J. Mass balance in leather processing [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: https://www.unido.org/sites/default/files/2009-05/Mass_balance_in_leather_processing_0.pdf.
18. Senior K. Chromium in the leather industry / K. Senior // World leather. – № 7. – 2000. – P. 51-55.
19. Danylkovych A. Gh. Tekhnologhija i obladnannja shkirjano-khutrovogho vyrobnyctva: navch. posib. / A. Gh. Danylkovych, V. I. Lishhuk. – K.: Feniks, 2007. – 312 s.
20. Palamar V. A. Puty povyshenja bezopasnosti naturalnykh kozh / Palamar V. A., Mokrousova O. R., Okhmat O. A. // Materyaly X mezhdunarodnoj nauchno-praktycheskoj konferencyy [«Kozha y mekh v XXI veke: tekhnologhija, kachestvo, ekologhija, obrazovanye»], (Ulan-Ude, Rossyja, 25-30 avghusta 2014). – Ulan-Ude: Yzd-vo VSGhUTU, 2015. – S. 80-86.
21. Potebenko O. A. Shljakhy pidvyshhennja ekologhichnosti procesu khromovogho dublennja u vyrobnyctvi naturalnoji shkiry / O. A. Potebenko, O. A. Okhmat, V. A. Palamar // Naukovyj Visnyk Mukachivskogo derzhavnogho universytetu. – 2016. – 21(16). – S. 32 – 37.
22. Smoljar V. Y. Racyonalnoe pytanye / V. Y. Smoljar. – K. : Naukova dumka, 1991. – 368 s.
23. Shkidlyvi khimichni rehovyny Neorghanychni zjednannja V-VIII grup: dovidkove vydannja / [Bandman A. L., Ghudzovskij Gh. A., Dubejkovsja L. S. ta in.] ; pid red. V. A. Filova. – Ljviv : Khimija, 1989. – 592 s.
24. Hertel R. F. Sources of exposure and biological effects of chromium / R. F. Hertel // Environmental carcinogens selected methods of analysis. – 1986. – Vol. 8. – P. 63-77.
25. Zauns R. An alternative approach to traditional chrome tanning / R. Zauns, P. Kuhm // JALCA. – 1995. – Vol. 90. – P.177-200.
26. Plavan V. P. Naukovi osnovy tekhnologhij orghanychno-mineralnogho dublennja dlja vyrobnyctva shkiry ta khutra z polipshenymy vlastyvjstajamy : avtoref. dys. na zdobuttja nauk, stupenja dokt. tekhn. nauk : spec. 05.18.18 «Tekhnologhija vzuttja, shkirjanykh vyrobiv i khutra» / V. P. Plavan. – K. : KNUUD, 2011. – 41 s.
27. Majstrenko L. A. Doslidzhennja procesu khromovogho dublennja iz zastosuvannjam polimernogho materialu – pokhidnoji malejinovoji kysloty / L. A. Majstrenko, O. A. Andrejeva, M. K. Koljada // Visnyk KNUUD. – 4. – 2013. – S. 1-11.
28. Sposib vyrobennja shkirjanogho napivfabrykatu: patent 15534 Ukrainina. № u200511472; zavjal. 02.12.2005; opubl. 17.07.2006, Bjul. № 7 [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu : <http://uapatents.com/3-15534-sposib-vyroblennja-shkiryanogo-napivfabrikatu.html>
29. Myneral'nij dubytel' na osnovе soedynenij cyrkonija: patent 2125096 Rosyjskaja Federacija. № 97121279/12; zavjal. 02.12.1997; opubl. 20.01.1999, Bjul. – 2. – 6 s.
30. Tarasevych Ju. Y. Stroenye y khymija poverkhnosti sloystykh sylykatov / Ju. Y. Tarasevych. – K. : Naukova dumka, 1988. – 248 s.
31. Zhao Y. T. Chinese developments in chrome-free and low-chrome tanning materials / Y. T. Zhao, X. C. Wang // JSLTC. – 2007. – Vol. 91. – P. 246-251.
32. Chen Y. Nanotechnologies for leather manufacturing: A review / Y. Chen, Fan and Bi Shi // JALCA. – 2011. – Vol. 106. – P. 261-273.
33. Bao Y. Preparation of acrylic resin/montmorillonite nanocomposite for leather tanning agent / Y. Bao, J. Ma, Y. L. Wangi // JALCA. – 2009. – Vol. 104, Issue 10. – P. 352-358.
34. Ghryshhenko I. M. Polifunkcionaljni shkirjani materialy: monografija / I. M. Ghryshhenko, A. Gh. Danylkovych, O. R. Mokrousova. – Kyjiv: Feniks, 2013. – 268 s.
35. Palamar V. A. Formuvannja bezpechnosti naturalnykh shkir z vykorystannjam montmorylonitu : avtoref. dys. na zdobuttja nauk, stupenja kand. tekhn. nauk : spec. 05.18.08 «Tovaroznavstvo neprroduvoljchyykh tovariv» / V. A. Palamar. – K. : KNTU, 2018. – 22 s.

Рецензія/Peer review : 12.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Касьян Е.С.

Ю.О. БАСОВА, Л.М. ГУБА, А.Б. БОРОДАЙ
ВНЗ Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі»
О.В. КАЛАШНИК
Полтавська державна аграрна академія

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВЗУТТЯ

У статті представлено аналітичне дослідження наявних та обґрунтування використання найбільш прогресивних засобів знезараження взуття. Встановлено, що найбільш поширеними є ті, які базуються на використанні хімічних реагентів (розчини, спреї), а також прилади, що обробляють взуття за допомогою ультрафіолетового опромінювання та/або за допомогою температурного впливу. Надано характеристику сучасних засобів знезараження взуття, що використовують в Україні, та визначено найбільш ефективний спосіб знезараження – ультрафіолетовим опромінюванням.

Ключові слова: взуття, засоби знезараження, мікроорганізми, ультрафіолетове опромінювання, хімічні реактиви, гігієнічні вимоги.

Y.A. BASOVA, L.N. HUBA, A.B. BORODAY
Poltava University of Economics and Trade
E.V. KALASHNIK
Poltava State Agrarian Academy

ANALYSIS OF MEANS OF FOOTWEAR DISINFECTION

This paper presents an analytical study of existing and justification of the most advanced means of disinfecting footwear. In Ukraine, normative documents that establish requirements for the hygienic properties of shoes are in force. Hygienic properties of footwear are characterized by harmlessness, moisture-proof, moisture-conducting, gas-exchange, heat-shielding properties, and properties that ensure the purity of shoes. They also include sanitary-microbiological properties that prevent the accumulation and development of microorganisms. The purpose of disinfection of footwear is to protect the feet from fungal infection, to neutralize the infection during intensive wearing of footwear and relapse during treatment, as well as from the appearance of an unpleasant odor. It has been established that some physical, chemical and biological factors may be affected by inhibition and complete disposal of microorganisms. The most common means of disinfection are recognized based on the use of chemicals, and the devices that handle shoes using ultraviolet irradiation and/or by thermal effects. The description of means of decontamination of footwear used in Ukraine is given, and the most effective method of disinfection - ultraviolet irradiation is determined. It allows for 99-100% destruction of microorganisms. Handy for footwear disinfection are special household appliances, whose work is based on the emission of the spectrum of ultraviolet rays. Their advantages are: the effectiveness of disinfection, hypoallergenicity and harmlessness for humans and animals, ease of use, minimal decontamination time. Thus, the direction of further research will be devoted to the practical application of ultraviolet radiation to disinfect the indoor parts of the footwear that was in use.

Keywords: shoes, decontamination, disinfection, disinfectants, microorganisms, UV irradiation, chemical reagents, hygiene requirements.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Взуття є невід'ємною частиною зовнішнього вигляду людини. Одними із найбільш важливих вимог до взуття є вимоги до його гігієнічності [1]. Практикою доведено, що під час носіння взуття можуть виникати певні проблеми. Серед них не тільки втрата показників експлуатаційних властивостей, передчасне старіння взуттєвих матеріалів, але й розвиток мікроорганізмів, неприємний запах, шкідливі захворювання. Це викликає незручності та навіть становить небезпеку для їх здоров'я. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, кожен п'ятий житель нашої планети страждає грибковими, гнійничковими та іншими видами ураження [2]. Для забезпечення захисту здоров'я необхідно широке застосування в повсякденному житті матеріалів і виробів з антимікробними, віруліцидними і антигрибковими властивостями.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор. В Україні розроблені та діють нормативні документи, які встановлюють вимоги до якості взуття, в тому числі і до гігієнічних показників [3, 4]. Так, ДСТУ 3485 [3] визначає такі гігієнічні показники якості взуття, як гнучкість, комфортність, водонепроникність, водопомокальність та намокальність в динамічних умовах. Державні санітарні норми та правила «Матеріали та вироби текстильні, шкіряні і хутрові. Основні гігієнічні вимоги» [4] регламентують гігієнічні показники безпеки та гігієнічні нормативи хімічних речовин, що виділяються із різних матеріалів та виробів, у тому числі і взуття. Ним визначається, що взуття повинно бути безпечним для здоров'я людини.

В роботі [5] зазначено, що гігієнічні властивості взуття повинні забезпечувати нормальний мікроклімат та комфортні умови для споживача. До них віднесені вологообмінні властивості та властивості виділяти шкідливі речовини, накопичувати статичну електрику. За даними [6] встановлено, що гігієнічні властивості взуття характеризуються нешкідливістю, вологозахисними, вологопровідними, газообмінними, теплозахисними властивостями, та властивостями, що забезпечують чистоту взуття. В роботі [7] зазначено, що гігієнічні властивості включають санітарно-мікробіологічні, які запобігають нагромадженню і розвитку мікроорганізмів. Однак враховуючи те, що останнім часом значно розширився асортимент основних та допоміжних матеріалів і речовин, які використовуються під час виробництва взуття, а також з'явилися новітні технології його виготовлення, дослідження та аналіз саме гігієнічних показників якості взуття є актуальним та своєчасним. Зважаючи на вищезазначене, доцільною є відповідність сучасного взуття

наступним гігієнічним принципам [8], таким як:

1) безпека під час експлуатації (не виділяти у взуттєвий простір хімічні речовини в концентраціях, здатних у реальних умовах експлуатації шкідливо впливати на шкіру стопи і організм в цілому (шкірно-подразнюючу, резорбтивну, алергенну тощо);

2) низька теплопровідність, забезпечення оптимального мікроклімату взуттєвого простору, його вентиляція;

3) зручність у використанні (не порушувати кровопостачання, ріст і формування кістково-м'язових елементів стопи, не сковувати рухи під час ходьби, забезпечувати захист стоп від несприятливих фізичних, хімічних і біологічних впливів);

4) антропометричність (відповідність віковим, розмірним та психофізіологічним особливостям організму);

5) легке очищення, висушування, зберігання початкової конфігурації тощо.

Стопа дорослої людини навіть під час незначного навантаження може виділяти у внутрішньо-взуттєвий простір 2-5 г поту за одну годину. Тому матеріали для внутрішніх деталей взуття повинні бути повітропроникними, забезпечувати оптимальний мікроклімат, який буде виводити зайву вологу із внутрішньо-взуттєвого простору [8]. Дослідженнями встановлено, що піт складається з води, солей, мікроелементів, кислот, холестерину, гормонів та інших речовин і не має запаху. Взуття набуває запаху під дією мікроорганізмів [9]. Волога для них – це оптимальне середовище: в ній мікроорганізми активно розмножуються. Тому, мати неприємний запах починають не тільки ноги, але і шкарпетки, і взуття [10].

Окрім неприємного запаху ці патогенні мікроорганізми можуть викликати шкірні захворювання. За статистикою [11] кожен 3 житель країни страждає від цієї проблеми на ногах. Лікування наслідків дії цих мікроорганізмів – тривалий процес, що включає не тільки вживання медикаментів, але і проведення профілактичних заходів. Тому обробка взуття при шкірних захворюваннях ніг – важлива складова, без якої лікування не принесе позитивного результату. Основна мета дезінфекції взуття – захист ніг від грибової інфекції, нейтралізації інфекції під час інтенсивного носіння взуття та рецидиву під час лікування, а також від появи неприємного запаху.

У якості деталей взуття використовують натуральні, штучні та синтетичні шкіри, текстильні (ткани, трикотажні, неткани) та комбіновані матеріали, які є доволі складними для очищення і знезараження. Під час розробки методів знезараження таких матеріалів враховують фізичні, хімічні та мікробіологічні процеси.

Найбільш важливими фізичними факторами навколишнього середовища, що впливають на життєдіяльність мікроорганізмів, є вологість (зниження відносної вологості повітря менше 70 % для грибів та 95 % – для бактерій), температура (дія низькими та високими температурами), випромінювання (вплив складного спектра сонячної радіації, електромагнітних хвиль, УФ-випромінювання, γ - і рентгенівського випромінювання, дії корпускулярних частинок високої енергії) і деякі інші.

Серед хімічних речовин можуть бути такі, які здатні затримувати розвиток мікроорганізмів і навіть викликати їх загибель: неорганічні сполуки (найбільш сильнодіючими є солі важких металів), окислювачі (хлор, йод, перекис водню, марганцевокислий калій), мінеральні кислоти (сірчиста, борна, плавикова). Впливають на мікроорганізми також сірководень, окис вуглецю, сірчистий газ.

До мікробіологічних процесів, що викликають загибель шкідливих мікроорганізмів, відносять дію комплексів мікроорганізмів-антагоністів [12].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Ріст і розмноження мікроорганізмів може гальмуватися, призупинятися під впливом різних несприятливих умов зовнішнього середовища, що можуть зумовити також загибель мікроорганізмів. Чинники, що виявляють вплив на мікроорганізми, можна поділити на фізичні, хімічні та біологічні (рис. 1) [13].

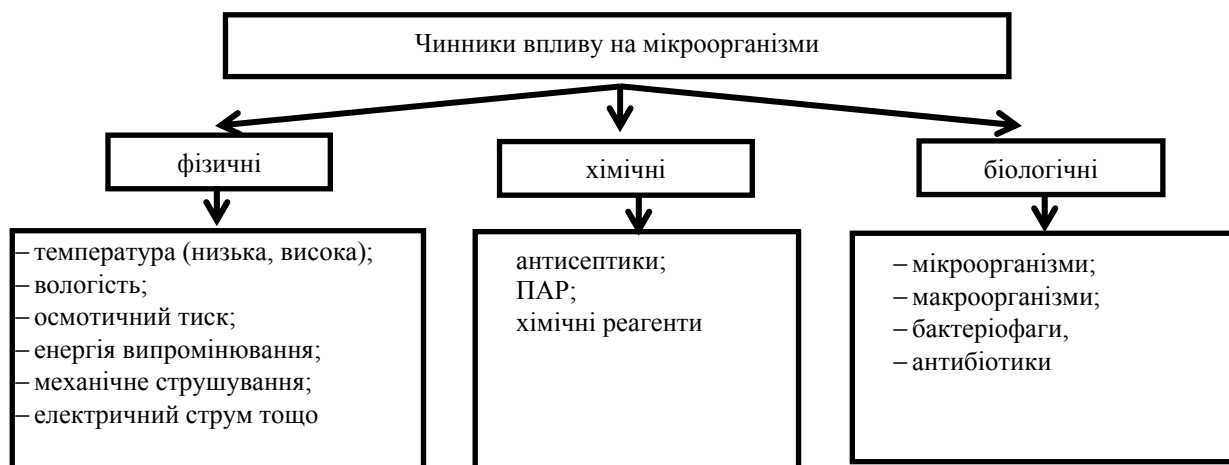


Рис. 1. Класифікація чинників впливу на мікроорганізми

Під час розробки методів знезараження поверхонь та матеріалів враховують фізичні, хімічні та

мікробіологічні чинники, які пригнічують мікроорганізми [14]. Наразі, зважаючи на вищенаведені чинники впливу на мікроорганізми, найбільш поширеними методами знезараження взуття є такі, що базуються на використанні:

– хімічних реагентів, що знищують мікроорганізми (у вигляді розчинів, спреїв, серветок);

– приладів, що обробляють взуття за допомогою ультрафіолетового (УФ) опромінення та/або за допомогою температурного впливу.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою даної статті є аналітичне дослідження наявних та обґрунтування використання найбільш прогресивних засобів знезараження взуття.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. При обробці взуття використовуються речовини, що ефективно борються з грибок нігтів на ногах. Аналізом інформаційних джерел [15] було встановлено, що для профілактики мікробного ураження взуття найзручнішими для використання у побуті є хімічні методи. Характеристика основних хімічних реагентів наведена у табл. 1

Таблиця 1

Характеристика хімічних реагентів, які застосовують для знезараження внутрішніх деталей взуття

№з/п	Реагент	Характеристика реагенту	Спосіб використання
1	оцтова кислота	речовина прозора з різким запахом, концентрація 40 %, діє на грибові захворювання стопи	змочити тампон з вати у підготовленому речовині; протерти бічну поверхню, носок;
2	формалін	речовина з різким запахом, є токсичною і канцерогенною, концентрація розчину не повинно бути вище 40 %; згубно діє на вегетативні клітини і спори	вийняти устілки, повністю їх обробити; взуття скласти в пакет з поліетилену, закрити, поставити в тепле місце на добу;
3	хлоргексидин	засіб без кольору та запаху, концентрацією 0,05-1,0 %; діє на віруси, бактерії, дріжджі і гриби-дерматофіти	після закінчення часу дістати, провітрити 2-3 дні.

Крім названих дезінфікуючих речовин існує ряд спеціально розроблених препаратів, які не мають таких серйозних побічних ефектів. Такі засоби прекрасно підходять як для знезараження взуття, так і для профілактичних цілей.

Мірамістин – засіб місцевого застосування із широким спектром дії. Не має запаху і зручний у використанні, використовується у вигляді 0,1 % розчину. Досить дорогий. Він не псує натуральні і штучні матеріали, його можна використовувати для зовнішніх і внутрішніх деталей взуття.

Дезавід – засіб, який не містить спирту, віддушок та хлору. Ефективно впливає на багато видів грибкових збудників (грибків роду *Candida*, гриби-дерматофіти, плісняві гриби). Не має запаху, не викликає алергії. Знищує неприємний запах та не залишає слідів на взутті. Випускається у вигляді спреїв, простий у застосуванні. Можна використовувати для деталей взуття із різних матеріалів.

Лайна – засіб, який застосовують для знезараження грибів (роду *Trichophyton*, *Candida*, плісняві гриби). Прозора рідина синього або зеленого кольору з характерним запахом. Не рекомендується застосовувати для взуття світлих кольорів. Можна використовувати для деталей взуття із різних матеріалів.

Мікостоп – засіб для протигрибової обробки взуття на основі ундециленаміну, має широкий спектр дії, ефективно знищує усі види патогенних грибів.

Біцин – ефективний антисептичний засіб у вигляді сухого порошку або рідини. Знищує різкий запах та застосовується для знезараження бактерій, спор та грибів (роду *Trichophyton*, *Candida*, дерматофітів, пліснявих грибів).

Формідрон – антибактеріальний та протигрибовий спиртовмісний засіб для боротьби з інфекціями.

Вологі дезінфікуючі серветки – просочені спеціальним протигрибовим розчином, не містять активних хімічних речовин, що викликають подразнення або алергію на шкірних покриттях. Зручні в застосуванні, компактні. Застосовують для обробки поверхні взуття, ступень ніг, інших поверхонь. Часто застосовуються для взуття в салярі або сауні [16].

Наразі на ринку представлена велика кількість різних засобів для антимікробної та антигрибової обробки взуття. Вони існують в різноманітних формах і їх ціна представлена в широкому діапазоні [17]. Всі перераховані вище засоби досить ефективні для знезараження взуття. Однак ці речовини вимагають дотримання запобіжних заходів і застосування індивідуального захисту. Найбільш часто у продажу зустрічаються у вигляді спреїв. До основних переваг спеціальних препаратів для знезараження внутрішніх деталей взуття відносяться: висока ефективність при дезінфекції, легкість застосування, відсутність потреби у додаткових засобах для обробки, відсутність неприємного запаху, невисока ціна. Недоліками таких препаратів є: складність вибору засобу, швидке псування дозаторів, необхідність досить тривалого застосування для отримання результату, необхідність застосування засобів індивідуального захисту під час знезараження [18].

Ультрафіолетове бактерицидне випромінювання є дійовим санітарно-епідеміологічним засобом, направленим на пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів в повітряному, водному середовищі та на поверхні предметів. Тому, ефективними для знезараження взуття є спеціальні побутові прилади, робота яких заснована на випромінюванні спектру ультрафіолетових променів, які ефективно борються з

збудниками грибкових захворювань [19-21]. Температура, при якій працюють сучасні апарати, дорівнює 70 °С, що забезпечує функцію сушіння взуття. Виробники пропонують різні прилади, які працюють від мережі та від первинних елементів живлення [22–26].

Таблиця 2

Характеристика приборів для знезараження взуття

Модель, зовнішній вигляд	Виробник, ціна	Технічні характеристики згідно з маркуванням
Ультрафіолетова антибактерицидна сушарка ЕСВ – 12/220К [22]	«Shine» (Україна, Харків), 200-280 грн.	Напруга живлення – 220 В. Споживана потужність – 12 Вт. Температура елемента при сушінні не більше – 50-60 °С. Час сушіння взуття – 3-6 год. Маса виробу, не більше – 0,5 кг. Час встановлення необхідної температури, не менше – 20 хв. Знищує на 99-100 % <i>Candida albicans</i> , <i>Trichophyton rubrum</i> , <i>Trichophyton mentagrophytes</i> , на 64,7-85,2 % бактерії <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Salmonella enteritidis</i> .
Сушарка взуття [23]	Черкаський завод телеграфної апаратури, Україна, 200 грн	Напруга живлення – 220 В; Споживана потужність – 7,0 Вт; Кількість режимів роботи – 1; Захист від перегрівання – є.
Сушарка для взуття Xenelight (Ксенелайт) [24]	Китай, 990 грн	Живлення – первинні елементи живлення типу «AAA» (2x4 шт.); Тип лампи – ультрафіолетові бактерицидні U-подібні; Діаметр лампи – 4 мм; Довжина ультрафіолетових хвиль – 253,7 нм. Час дезінфекції взуття – 5 хв; Час знезараження – 5-7 хв; Час сушіння взуття – 3 год; Час роботи на одному комплекті елементів живлення – 2-4 місяці.
Сушарка дезодоратор для взуття [25]	Китай, 375 грн	Напруга живлення – 220 В; Споживана потужність – 14 Вт; Температура повітря під час сушіння – 60 +/- 5 °С; Вага – 0,256 кг; Розмір – 15 x 7 см; Рекомендується для: шкіряного, текстильного, спортивного туристичного взуття; Не рекомендовано: для спеціального взуття.
Сушарка для взуття Timson (Тімсон) [26]	ТОВ «Тімсон» (Росія), 280 грн	Напруга живлення – 220 В; Споживана потужність 5-7 Вт; Маса виробу – 0,4 кг; Температура повітря під час сушіння – 60-70 °С; Час сушіння взуття – 5-8 год; Час встановлення необхідної температури – 20 хв; Знищує <i>Candida albicans</i> , <i>Trichophyton rubrum</i> , <i>Trichophyton mentagrophytes</i> – 99-100 %; бактерії <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Salmonella enteritidis</i> 64,7-85,2 %.

Основними перевагами спеціальних побутових приладів є: ефективність дезінфекції, гіпоалергенність та нешкідливість для людей і тварин, зручність у використанні, мінімальний час знезараження. Проте вони мають і недоліки: високу ціну, неекономічність (тривалість обробки 8-10 год.), можливість використання не для всіх видів матеріалів.

Висновки

1. Встановлено фізичні, хімічні та біологічні чинники, які можуть впливати на пригнічення та повне знешкодження мікроорганізмів. Для знезараження взуття у побуті найзручнішими визнані хімічні методи, проте їх використання потребує тривалого часу для досягнення результату та додаткових засобів індивідуального захисту.

2. Шляхом аналізу інформаційних джерел та асортименту приборів знезараження взуття, що реалізуються на сучасному ринку, встановлено, що найбільш оптимальним для знезараження взуття є використання ультрафіолетового випромінювання, яке чинить ефективну бактерицидну дію та дозволяє на 99-100 % знищувати мікроорганізми.

3. Зважаючи на результати проведеного аналізу, напрямки подальших досліджень будуть присвячені практичному застосуванню ультрафіолетового випромінювання для знезараження внутрішніх деталей взуття, яке було в експлуатації.

Література

1. Правила гигиены обуви [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://all-gigiena.ru/gigiena-obuvi>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.
2. Грибковые заболевания кожи [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://m.medsovet.info/articles/1775>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.11.2017.
3. ДСТУ 3485 Взуття. Номенклатура показників якості. – Чинний від 1998. 01.01. – Київ : Держспоживстандарт України. – 11 с.
4. Державні санітарні норми та правила «Матеріали та вироботи текстильні, шкіряні і хутрові. Основні гігієнічні вимоги» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0086-13>. – Дата звернення: 15.05.2018.
5. Иванов М. Н. Товароведение обувных товаров : учеб. пособие для вузов / М. Н. Иванов, И. Г. Шакланов, В. А. панасенко. – М. : Экономика, 1990. – 320 с.
6. Савина З. Г. Товароведение обуви / З. Г. Савина – М. : Экономика, 1984. – 248 с.
7. Кушнір, М. К. Товарознавство взуттєвих товарів : підручник / М. К. Кушнір, Н.П. Тихонова. – Київ : НМЦ Укоопосвіта, 2001. – 266 с.
8. Гигиена обуви [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.e-reading.club/chapter.php/1000926/64/Eliseev_Yuriy_-_Obschaya_gigiena%3A_konspekt_lekciy.html. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.
9. Як позбутися неприємного запаху взуття [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://korusna.info/pobut/yak-pozbutysya-nepryemnogo-zapahu-vzuttya.html#ixzz4uizNwf48>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 17.11.2017.
10. Лечебный текстиль [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.rkm.kz/node/896>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 11.11.2017.
11. Кандидоз у медичній практиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.health-ua.org/faq/infekcionnye-zabolevaniya/2862.html>. – Дата звернення: 15.05.2018.
12. Пехташева Е.Л. Биоповреждения и защита непродовольственных товаров / Е.Л. Пехташева. – М. : Мастерство, 2002. – 224 с.
13. Вплив на мікроорганізми фізико-хімічних і біологічних чинників [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://twin.nauu.kiev.ua/vet/sep.nsf/b3266a3c17f9bb7085256b870069c0a9/1c4facb973374574c225724e00549701>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.
14. Епізоотологія з мікробіологією : підручник [Електронний ресурс] / Г.В. Козловська, Л.Є. Корнієнко, М.Г. Наконечна та ін. ; за ред. В.П. Постоля. – К. : Вища освіта, 2006. – 543 с. – Режим доступу : <http://portal.nauu.kiev.ua/vet/sep.nsf/b3266a3c17f9bb7085256b870069c0a9/1c4facb973374574c225724e00549701>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.11.2017.
15. Вибір способу профілактики мікробного ураження взуття / О.В. Калашник, Ю.О. Басова, Л.М. Губа // Інноваційні матеріали та технології шкіряно-хутрового виробництва : збірник тез III Міжнародного науково-практичного семінару (2 грудня 2017 року). – Київ : КНУТД, 2017. – С. 96–98.
16. Абетка здоров'я. Інформаційний портал про здоров'я. Чим обробляти взуття при грибку стопи [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.a-betka.in.ua/2016/10/chym-obroblyaty-vzuttya-pry-grybku.html>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.
17. Дезинфекция обуви после грибковой инфекции [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://xn----btbfgrcpblyt3f.xn--p1ai/dezinfekciya-obuvi-posle-gribkovoij-infekcii/>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018
18. Дезинфекция обуви от грибка в домашних условиях [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://lecheniegribka.com/uxod-za-nogyami/obrabotka-obuvi.html>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.
19. Вассерман А.Л. Ультрафиолетовое излучение в профилактике инфекционных заболеваний / А. Л. Вассерман, М.Г. Шандала, В.Г. Юзбашев. – М. : Медицина, 2003. – 208 с.
20. Сарычев Г.С. Высокоинтенсивные источники ультрафиолетового излучения и их применение в технологических процессах / Г.С. Сарычев, Г.Н. Гаврылкина // Светотехника, 1999. – № 9/79. – С. 5–7.
21. Калашник О. В. Джерела УФ-опромінення для консервування хутрової сировини / О. В. Калашник, Ю. О. Басова // Інноваційні матеріали та технології шкіряно-хутрового виробництва : збірник тез II Міжнародного науково-практичного семінару (19 листопада 2016 року). – Київ : КНУТД, 2016. – С. 18–20.
22. Prom.ua / Полтава / Потребительские товары / Сушилка для обуви с антибактериальным эффектом ЕСВ - 12/220К, ультрафиолетовая, питание от сети, мощность 12 Вт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://prom.ua/p667873909-sushilka-dlya-obuvi.html>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.
23. Prom.ua / Полтава / Потребительские товары / Сушилки для обуви бытовые электрические Черкасский завод телеграфной аппаратуры в Полтаве [Електронний ресурс]. – Режим доступу :

https://poltava.prom.ua/Sushilki-dlya-obuvi-bytovoye-elektricheskie;bss0-proizvoditel-220031-Cherkasskij_zavod_telegrafnoj_apparatury. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.

24. Интернет-магазин zakupka.biz / Сушилка для обуви с ультрафиолетом "ксенелайт d" противогрибковая [Elektronnyy resurs]. – Режим доступу : <http://www.zakupka.biz/sushilka-dlya-obuvi-s-ultrafioletom-ksenelayt-d-protivogribovaya.php>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.

25. TopShop. Товары из Китая. Сушка дезодоратор дезинфектор shoes нагревателя электрическая сушилка для обуви [Elektronnyy resurs]. – Режим доступу : <https://1topshop.org.ua/p619556285-sushka-dezodorator-dezinfektor.html>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.

26. Медицинский блог врача скорой помощи. Проблема дезинфекции обуви при грибке ногтей и стоп [Elektronnyy resurs]. – Режим доступу : <http://www.happydoctor.ru/info/538>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.05.2018.

References

1. Pravila gigiyeny obuvi. [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu : <http://all-gigiena.ru/gigiena-obuvi>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennya: 15.05.2018.
2. Gribovyye zabolevaniya kozhi [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://m.medsovet.info/articles/1775>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennya: 15.11.2017.
3. DSTU 3485 Vzuttia. Nomenklatura pokaznykiv yakosti. – Chynnyi vid 1998. 01.01. – Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. – 11 s.
4. Derzhavni sanitarni normy ta pravyla «Materialy ta vyroby tekstylni, shkiriani i khutrovi. Osnovni hiihienichni vymohy» [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0086-13>. – Data zvernennia: 15.05.2018.
5. Ivanov M. N. Tovarovedeniye obuvnykh tovarov : ucheb. posobiye dlya vuzov / M. N. Ivanov. I. G. Shaklanov. V. A. panasenko. M.: Ekonomika. 1990. – 320 s.
6. Savina Z. G. Tovarovedeniye obuvi / Z. G. Savina – M. : Ekonomika. 1984. – 248 s.
7. Kushnir, M. K. Tovaroznavstvo vzuttievykh tovariv : pidruchnyk / M. K. Kushnir, N.P. Tykhonova. – Kyiv : NMTs Ukooposvita, 2001. – 266 s.
8. Gigiyena obuvi. [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: https://www.e-reading.club/chapter.php/1000926/64/Eliseev_Yuriy_-_Obschaya_gigiena%3A_konspekt_lekciy.html. – Nazva z ekrana. – Data zvernennya: 15.05.2018.
9. Yak pozbutysia nepryemnoho zapakhu vzuttia [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://korusna.info/pobut/yak-pozbutysya-nepryemnoho-zapahu-vzuttia.html#ixzz4uizNwf48>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 17.11.2017.
10. Lechebnyy tekstil [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.rkm.kz/node/896>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennya: 11.11.2017.
11. Kandydoz u medychnii praktytsi [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.health-ua.org/faq/infekcionnye-zabolevaniya/2862.html>. – Data zvernennia: 15.05.2018.
12. Pekhtasheva E.L. Biopovrezhdeniya i zashchita neprodovolstvennykh tovarov / E.L. Pekhtasheva. – M. : Masterstvo. 2002. – 224 s.
13. Vplyv na mikroorhanizmy fizyko-khimichnykh i biolohichnykh chynnykiv [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://twin.nauu.kiev.ua/vet/sep.nsf/b3266a3c17f9bb7085256b870069c0a9/1c4facb973374574c225724e00549701>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
14. Epizootolohiia z mikrobiolohiiei: Pidruchnyk / H.V. Kozlovska, L.Ye. Korniienko, M.H. Nakonechna ta in.; Za red. V.P. Postoia. — K.: Vyscha osvita, 2006. — 543 s. [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://portal.nauu.kiev.ua/vet/sep.nsf/b3266a3c17f9bb7085256b870069c0a9/1c4facb973374574c225724e00549701>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.11.2017.
15. Vybir sposobu profilaktyky mikrobnoho urazhennia vzuttia / Kalashnyk O.V., Basova Yu.O., Huba L.M. // Innovatsiini materialy ta tekhnolohii shkiriano-khutrovoho vyrobnytstva : zbirnyk tez III Mizhnarodnoho naukovopraktychnoho seminaru (2 hrudnia 2017 roku). – Kyiv : KNUVD, 2017. – S. 96-98.
16. Abetka zdorovia. Informatsiinyi portal pro zdorovia. Chym obroblaty vzuttia pry hrybku stopy [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.a-betka.in.ua/2016/10/chym-obroblaty-vzuttia-pry-grybku.html>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
17. Dezinfektsiya obuvi posle gribovyykh infektsii. [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://xn----btfgpcpblyt3f.xn--plai/dezinfektsiya-obuvi-posle-gribovyykh-infektsii/>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
18. Dezinfektsiya obuvi ot griбка v domashnikh usloviyakh. [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://lecheniegribka.com/uxod-za-nogtyami/obrabotka-obuvi.html>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
19. Vasserman A.L. Ultrafioletovoye izlucheniye v profilaktike infektsionnykh zabolevaniy / A. L. Vasserman. M.G. Shandala. V.G. Yuzbashev - M.: Meditsina. 2003. – 208 s.
20. Sarychev G.S., Gavrylkina G.N. Vysokointensivnyye istochniki ultrafioletovogo izlucheniya i ikh primeneniye v tekhnologicheskikh protsessakh // Svetotekhnika. 1999. – №9/79. – S. 5-7.
21. Kalashnyk O. V. Dzhherela UF-opromineivannia dlia konservuvannia khutrovoi syrovyny / O. V. Kalashnyk, Yu. O. Basova // Innovatsiini materialy ta tekhnolohii shkiriano-khutrovoho vyrobnytstva : zbirnyk tez II Mizhnarodnoho naukovopraktychnoho seminaru (19 lystopada 2016 roku). – Kyiv : KNUVD, 2016. – s. 18-20.
22. Prom.ua / Poltava / Potrebitelskiye tovary / Sushilka dlya obuvi s antibakterialnym efektom ECB - 12/220K. ultrafioletovaya. pitaniye ot seti. moshchnost 12 Vt [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://prom.ua/p667873909-sushilka-dlya-obuvi.html>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
23. Prom.ua / Poltava / Potrebitelskiye tovary / Sushilki dlya obuvi bytovoye elektricheskiye Cherkasskij zavod telegrafnoj apparatury v Poltave [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: https://poltava.prom.ua/Sushilki-dlya-obuvi-bytovoye-elektricheskie;bss0-proizvoditel-220031-Cherkasskij_zavod_telegrafnoj_apparatury. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
24. Internet-magazin zakupka.biz / Sushilka dlya obuvi s ultrafioletom "ksenelayt d" protivogribovaya [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.zakupka.biz/sushilka-dlya-obuvi-s-ultrafioletom-ksenelayt-d-protivogribovaya.php>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
25. TopShop. Товары из Китая. Сушка дезодоратор дезинфектор shoes нагревателя электрическая сушилка для обуви [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://1topshop.org.ua/p619556285-sushka-dezodorator-dezinfektor.html>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.
26. Meditsinskiy blog vracha skoroy pomoshchi. Problema dezinfektsii obuvi pri gribke nogtey i stop [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.happydoctor.ru/info/538>. – Nazva z ekrana. – Data zvernennia: 15.05.2018.

Рецензія/Peer review : 22.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кожушко Г.М.

О.И. ВОДЗИНСКАЯ

Киевский национальный университет технологий и дизайна

К.Д. КИСЛЕНКО

ЧП Глицкий О.И., ТМ "ORA", г. Днепр

ПРОИЗВЕДЕНИЯ ИСКУССТВА И ЖИВОПИСИ КАК ТВОРЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК В ДИЗАЙН-ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ КОЛЛЕКЦИИ ОДЕЖДЫ

В статье представлен поиск дизайнерских решений при создании промышленной коллекции женских изделий с применением авторского принта, разработанного на основе синтеза творчества Pablo Picasso. Разработан коллаж, сформулирована творческая концепция, на основании чего создан дизайн рисунка ткани как результат анализа произведений искусства великого художника. В соответствии с модными тенденциями и творческим источником создана промышленная коллекция женской летней одежды «Кубизм» из хлопково-льняных материалов для женщин младшей возрастной группы, которая внедрена в производство под торговой маркой "ORA".

Ключевые слова: авторский принт, стиль кубизм, творчество Pablo Picasso, промышленная коллекция женской одежды, творческий источник.

OKSANA VODZINSKA

Kyiv National University of Technologies and Design

KATERINA KISLENKO

Private enterprise Glitskiy O.I., trademark "ORA", Dnipro

ART AND PAINTING IN WORKS AS A CREATIVE SOURCE IN THE DESIGN OF THE INDUSTRIAL CLOTHES COLLECTION

The purpose of the work is to create an industrial collection of women's products from cotton-linen materials with the use of the author's print, which developed on the basis of the synthesis of the Pablo Picasso creativity. Main tasks of the research: analysis fashion trends of world brands collections, model silhouettes and clothing elements in the style cubism; structural analysis of the creative source, formulation of the creative concept; development of a fabric pattern on the basis of paintings by Pablo Picasso; development of composition image solution of collection models taking into account fabric rapport; manufacture of a collection of women's clothing in industrial conditions. The system principle is methodological basis of work. A systematic approach has been used for the study with using methods of comparative-historical, formal-typological, structural-functional, artistic-compositional, art-study analysis and experimental design. The creative conception has been formulated and the design of a fabric drawing which base on art works by Pablo Picasso has been developed. The fish, the eye and the piano are selected as the print elements for the fabric. The fish symbolizes man: the fish in the water, like a man in the sky, swim all life, looking for his destination. The eye is a symbol of observation and providence of the "Great Builder of the Universe" (God). The piano is a symbol of the melody of the soul that accompanies a person throughout life. Not trying to reproduce the pictures of the genius author, but only drawing inspiration in his work, the image of a woman, who will dress the products of this collection, was presented in the fabric picture, as a fish in the endless modern world. Numerous fish eyes symbolize the diversity of views of the person and his environment. Brightness of colors in the print indicates the rich inner world of man, his openness to the universe, the desire to perceive all colors of life and experience the multifaceted feelings. The print is framed in the piano keys, which reminds of an eternal spiritual melody, which, like a moonlit track, accompanies a person all his life. An industrial collection of women's summer clothes "Cubism" was created. It was introduced into production under the trademark "ORA".

Keywords: author's print, the style "cubism", the works of Pablo Picasso, an industrial collection of women's clothing, creative source.

Постановка проблемы

Одним из основных заданий, стоящих перед современным дизайнером, является применение достижений науки, техники и искусства в создании изысканного стиля женщины. Мода и искусство взаимосвязаны. Картины великих художников становятся предметом вдохновения и черпания идей среди дизайнеров с мировым именем. С каждым сезоном коллекций с арт-принтами становится все больше, что свидетельствует об актуальности данного творческого направления.

В современных условиях развития индустрии моды актуальным также является внедрение авторских коллекций в производство небольшими партиями [1].

Анализ последних источников

Принты в одежде однозначно делают вещи оригинальными и яркими. В сезонах весна-лето 2017-2018 настоящим хитом на подиумах стали принты, выполненные в виде арт-рисунков: казалось, что дизайнеры демонстрировали не коллекции, а экспозиции полотен известнейших художников мира. Частью декора стали фрагменты картин, мозаичная техника, фотопринты, пейзажи природы (рис. 1) [2].

Изображение личности – популярный мотив повседневной одежды. Иногда они перенесены на одежду с необычных портретов в стиле поп-арт (рис. 2) [3].

Многие дизайнеры использовали в своих коллекциях элементы картин знаменитых полотен. Шедевры основоположника



Рис. 1. Принт в стиле кубизм из коллекции JC de Castelbajac

кубизма Р. Picasso вдохновили сразу нескольких кутюрье (рис. 4, 5). В коллекции AndrewGn прослеживаются мотивы творчества сразу двух художников: Pablo Picasso и художника-экспрессиониста Fernand Leger [4].

В коллекции Naeem Khan встречаются фольк-мотивы картин Фриды Кало. А образ моделей списан с автопортрета самой художницы. Геометрический орнамент в стиле кубизм использован в осенне-зимней коллекции Oscar de la Renta (рис. 6) [5].



Рис. 2. Картина Р. Picasso «Голова с двух сторон» (1958 г.) и платье в стиле кубизм Antonio Marras



Рис. 3. Картина Р. Picasso «Чтение» (1932 г.) и модели коллекции JC de Castelbajac



Рис. 4. Картина Fernand Leger «Кубизм» и модели коллекции AndrewGn



Рис. 5. Картина Fredu Calo «Автопортрет-Рамка» и образ модели коллекции Naeem Khan

Современные исследователи в области дизайна костюма также обращаются к творчеству знаменитых художников, этнографов, архитекторов, черпая вдохновение при создании своих коллекций в исторических образах народного костюма, известнейших шедеврах искусства и архитектуры, предметах быта и декоративно-прикладного искусства, а также природных формах растительного и животного мира [1, 6–8]. Таким образом, коллекции знаменитых дизайнеров с мировых подиумов вдохновляют к созданию промышленной коллекции изделий на основе творчества Р. Picasso в стиле кубизм для украинского потребителя.

Целью работы является создание промышленной коллекции женских изделий из хлопково-льняных материалов с применением авторского принта, разработанного на основе синтеза творчества Pablo Picasso.

Для достижения цели сформулированы основные задачи исследования:

- анализ модных тенденций коллекций мировых брендов, модельных силуэтов и элементов одежды в стиле «кубизм»;
- структурный анализ творческого источника, формулирование творческой концепции;
- разработка принта ткани на основе картин Pablo Picasso;
- создание композиционных решений моделей коллекции с учетом особенностей рапорта рисунка ткани;
- изготовление изделий коллекции женской одежды в промышленных условиях.

Изложение основного материала

Анализ модных тенденций в одежде представлен в таблице 1.






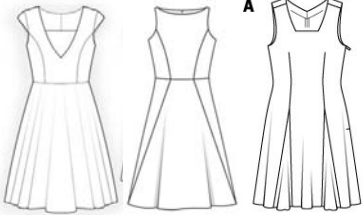
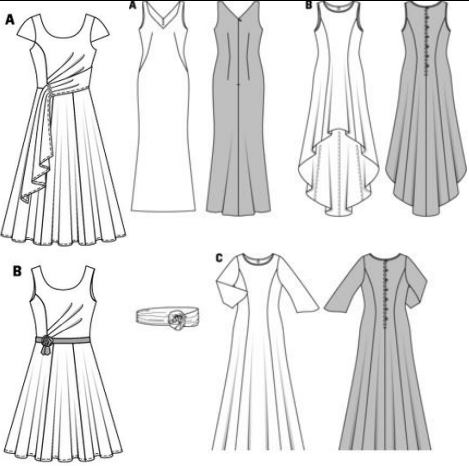
Художественная концепция кубизма построена на попытке найти самые простые модели и формы вещей и явлений, в которых выражается вся сложность и разнообразие жизни [9]. Для раскрытия полноты идеи создан творческий коллаж на тему «Стиль кубизм», представленный на рис. 7.



Рис. 6. Картина Fernand Leger «Пропеллеры» (1918 г.) и модель из показа коллекции Oscar de la Renta

Варианты композиционного, конструктивного и пластического решения моделей изделий женского ассортимента

№ п/п	Название признака	Характеристика признака	Изображение
1	2	3	4
Признаки формы			
1	Стилевое решение	Элегантный и романтический стиль	
2	Объемность формы	Средняя	
3	Силуэт	Полуприлегающий	
Характеристики основного материала			
4	Вид ткани	Лен, хлопок, шелк, трикотажное полотно	
5	Цвет	Желтый, зеленый, голубой, оранжевый, белый, пастельные оттенки	
6	Фактура	Фактурные, шершавые или гладкие, блестящие	
7	Материалы приклада	Флизелин и дублерин	

1	2	3	4
8	Фурнітура	Тесьма-«молнія», металіческие кнопки, хлопчатобумажная декоративная тесьма, люверсы	
9	Отделка	Вышивка, аппликация	
10	Аксессуары	Шляпы и очки	
Признаки конструкции			
11	Линии членения	Горизонтальные, вертикальные, наклонные	
12	Формообразующие элементы	Выточки, складки, защипы, подрезы, кокетки	
13	Вырез горловины	Батто, карэ, декольте	
14	Длина изделия	Средняя, midi и maxi	

Американский писатель Остин Клеон в своей знаменитой на весь мир книге «Кради как художник» писал: «Не воруйте стиль в целом, позаимствуйте сам образ мыслей, положенных в основу. Вам не нужно выглядеть, как ваши герои, вам нужно видеть, как они» [10].

Рождение идеи для данной коллекции начинается с чудесного, наполненного разнообразием красок творчества французского и испанского художника, одного из известнейших творцов XX века Pablo Picasso [1]. Проникнув творчеством великого художника, а также на основании анализа мотивов картин в стиле кубизм, выполнено отражение личного виденья этого стиля в принте ткани для коллекции женских изделий «Кубизм». Структурный анализ источника творческого вдохновения – известнейших картин художника «Три музыки» (1921 г.), «Рыдающая женщина» (1937 г.), «Чтение» (1932 г.) – позволил выделить их колористическую гамму, силуэтные формы, орнаментально-декоративные приемы, стилистические особенности и применить их с целью создания принта ткани для будущей коллекции [9]. В результате структурного анализа творческого источника созданы две цветовые гаммы, которые характерны для стиля кубизм: первая – это яркие оттенки желтого, оранжевого, красного, зеленого, голубого, синего и белого, вторая – теплые пастельные оттенки телесного, коричневого, бордо, провинциально-голубого, синего и белого цветов (рис. 8).



Рис. 7. Творческий коллаж на тему «Стиль кубизм»



Рис. 8. Структурный анализ творческого источника



Рис. 9. Трансформация творческого источника в принт ткани



Рис. 10. Рапорт ткани в двух цветовых решениях

В качестве элементов принта для ткани избраны рыба, глаз и пианино. Рыба символизирует человека: рыба в воде, как человек в небе – плывет всю жизнь, ищет свое предназначение. Глаз – это символ «Лучистой дельты» – наблюдения и провидения «Великого Строителя Вселенной» (Бога). Пианино – символ мелодии души, которая сопровождает человека на протяжении всей жизни (рис. 9).

Разработанный принт ткани состоит из элементов, которые построены из геометрических фигур и подчеркнуты тенью, что характерно для кубизма (рис. 10). На полотне композиция построена контрастно, чувствуется ритм форм, цветов и линий. При детальном рассмотрении принта ткани взгляд зрителя должен перемещаться от левого угла, который затемнен, до более светлых оттенков правого. Также в принт ткани добавлены нотки сюрреализма, для которого характерно существенное усиление женского начала, что внедрено в своеобразие и живописных особенностях принта: вместо резких, ломаных линий и неуклюжих фигур, присущих кубизму, центральное место занимают округлые, мягкие формы рыбы.

Не пытаюсь воспроизвести картины гениального автора, а лишь черпаю вдохновение в его творчестве, на рисунке ткани представлен образ женщины, которая оденет изделия этой

коллекции, в виде рыбы, плывущей в бескрайнем современном мире. Численные глаза рыбы символизируют разнообразие взглядов самого человека и его окружения. Яркость красок в принте указывает на богатый внутренний мир человека, его открытость вселенной, желание воспринимать все цвета жизни и переживать многогранность чувств. Принт обрамлен в клавиши пианино, что напоминает про вечную духовную мелодию, которая, словно лунная дорожка, сопровождает человека всю жизнь.

С учетом особенностей принта ткани разработаны эскизы коллекции летней женской одежды из хлопчатобумажной и льняной ткани, состоящей из пяти изделий широкого ассортиментного ряда: платье-футляр, сарафан, шорты, юбка и блузка. Особенностью моделей является простота силуэтных линий, минимальное количество членений и отсутствие декоративных элементов в связи со сложным и насыщенным рисунком ткани и его большим рапортом (рис. 11). Модели коллекции предназначены для женщин младшей возрастной группы, которые ведут активный образ жизни, проживают в мегаполисе и заняты творческим видом деятельности.



Рис. 11. Эскизный ряд моделей коллекции с авторским принтом

Оригинальность идеи при разработке коллекции женских изделий подтверждена Патентом на изобретение «Комплект женской одежды» [11]. Особенности коллекции являются уникальностью авторского принта и модельные особенности изделий с учетом большого рапорта ткани.

Разработка базовых и модельных конструкций изделий выполнена по методике ЄМКО СЕВ в подсистеме «PGS Model» САПР «Investronica». Пример моделирования базовой модели для женской блузки представлен на рис. 12. С целью рационального использования материалов выполнена трехмодельная раскладка для многонастильного разкроя изделий коллекции, которая разработана в подсистеме «Марка» САПР «Investronica» (рис. 13) [12].

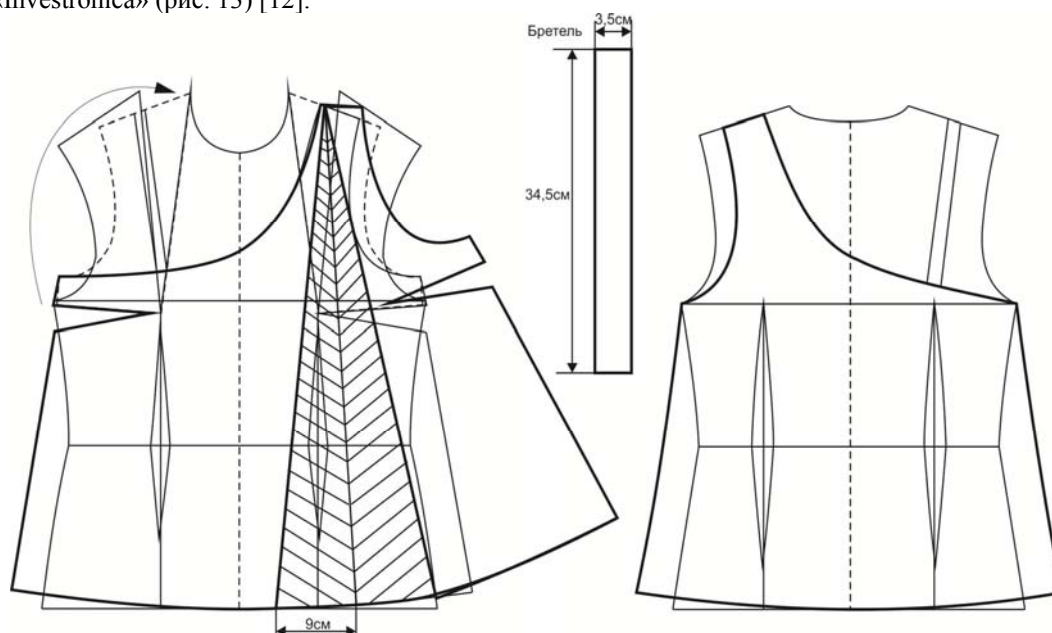


Рис. 12. Моделирование базовой модели женской блузки

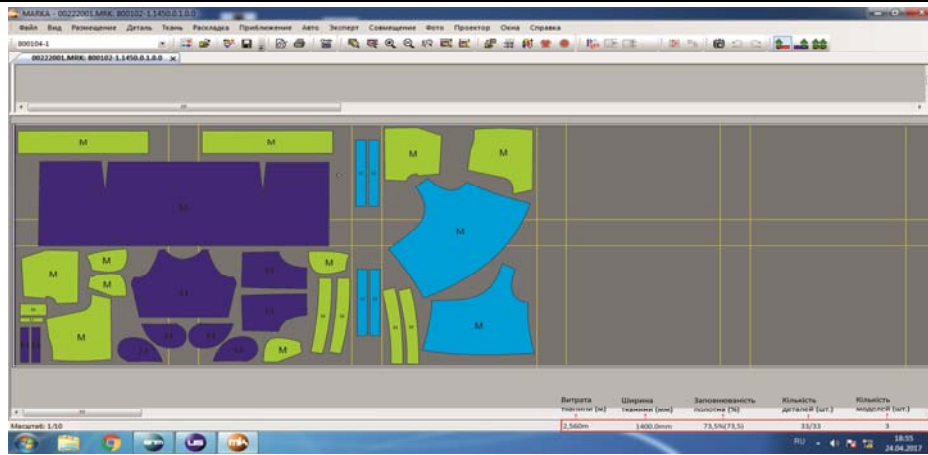


Рис. 13. Трехмерная раскладка лекал изделий коллекции с учетом большого рапорта ткани, выполненная в САПР Investronica, подсистеме PGS Model

Перед запуском изделий в массовое производство проведена профессиональная фотосессия моделей коллекции (рис. 14). По результатам продаж первой партии изделий (платье-футляр, сарафан и шорты) сделаны выводы о позитивной оценке коллекции потребителем. Первое место по уровню продаж заняло платье-футляр (рис. 15). Эта модель коллекции наиболее полно позволяет раскрыть полномасштабность принта ткани, детализировать каждый отдельный элемент рисунка, а клавиши пианино, размещенные полосой по низу изделия, завершают композицию образа – платье «женщина-картинка».



Рис. 14. Изделия коллекции «Кубизм»



Рис. 15. Результаты продаж первой партии изделий коллекции «Кубизм»

Выводы

Таким образом, при проектировании промышленной коллекции моделей женской одежды концепция образа, которая базируется на произведениях искусства Pablo Picasso, отображена через принт ткани, простоту силуэтных линий, отсутствие декоративных элементов, минимальное количество членений и малые объемы изделий.

Положительной тенденцией является внедрение моделей коллекции с авторским принтом в промышленное производство. Новизна идеи авторского принта ткани признана на Всеукраинской выставке изделий швейных предприятий Украины «Киев Экспо-Стиль 2017».

Литература

1. Пашкевич К. Л. Архітектура як творче джерело дизайн-проекування колекцій одягу складних об'ємно-просторових форм / К. Л. Пашкевич, М. В. Колосніченко, І. В. Фролов, К. О. Науменко // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – 2016. – Випуск 43. – Частина 1. – С. 270–280.
2. Модные тенденции 2017-18 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.vogue.ru/>

3. Какие живописные картины актуальны этой осенью [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http:// lady.day.az/news/fashion/522771.html](http://lady.day.az/news/fashion/522771.html)
4. Cristian Zervos. Каталог работ Пабло Пикассо. 1895-1972 : 33 тома / Cristian Zervos.. – Франция : Издательство Indépendant.
5. Семь тканей будущего сегодня [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.lookatme.ru>
6. Паранько Н. П. Дослідження структури форми українського народного костюма на основі аналізу творчої спадщини етнографа Домініка Де Ля Фліза / Н. П. Паранько, Т. В. Ніколаєва // Вісник КНУТД. – 2016. – № 1. – С. 140–146.
7. Мороко О. М. Розробка творчої колекції моделей жіночого одягу на основі робіт художника Кевіна Лукберта / О.М. Мороко, Н.В. Остапенко // Тези доповіді XV Всеукр. наукової конф. молодих учених та студентів [«Наукові розробки молоді на сучасному етапі»], (Київ, 28-29 квітня 2016 р.) / Мін-во освіти і науки України, КНУТД. – К. : КНУТД, 2016. – С. 74.
8. Литвиненко Л. М. Дизайн колекції вечірніх суконь з формотворчими елементами сталагмітів / Л. М. Литвиненко // Вісник ХНТУ. – 2017. – № 2. – С. 166–170.
9. Анри Жидель. Пикассо / Анри Жидель ; [пер. Л. Матяш]. – К. : Видавництво «Молода гвардія», 2007. – 458 с.
10. Остин Клеон. Кради как художник / Остин Клеон ; [пер. с англ. С. Филина]. – М. : Манн. Иванов и Фербер, 2013. – 176 с.
11. Патент на промисловий зразок 36565 Україна. Комплект жіночого одягу / Кисленко К. Д., Водзінська О.І. ; заявник та патентовласник Київський нац. ун-т технологій та дизайну. – № s201701922 ; заявл. 27.10.17 ; опубл. 10.04.18, Бюл. № 7.
12. Основи технологій експериментального та підготовчо-розкрійного виробництв : навчальний посібник / [Березненко С. М., Водзінська О. І., Білоцька Л. Б., Донченко С. В.]. – К. : КНУТД, 2017. – 171 с.

References

1. Pashkevych K. L. Arkhitektura yak tvorche dzherelo dyzain-proektuvannya kolektsii odiahu skladnykh ob'ємno-prostorovykh form / K. L. Pashkevych, M. V. Kolosnichenko, I. V. Frolov, K. O. Naumenko // Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya. – 2016. – Vypusk 43. – Chastyна 1. – S. 270–280.
2. Modnyie tendentsii 2017-18 [Elektronnyi resurs]. – Rejim dostupa : <https://www.vogue.ru/>
3. Kakie jivopisnyie kartyni aktualnyi etoy osenyu [Elektronnyiy resurs]. – Rejim dostupa : [http:// lady.day.az/news/fashion/522771.html](http://lady.day.az/news/fashion/522771.html)
4. Cristian Zervos. Katalog rabot Pablo Pykasso. 1895-1972 : 33 toma / Cristian Zervos.. – Frantsyia : Yzdatelstvo Indépendant.
5. Sem tkanei budushcheho sehodnia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : <http://www.lookatme.ru>
6. Paranko N. P. Doslidzhennia struktury formy ukrainskoho narodnoho kostiuma na osnovi analizu tvorchoi spadshchyny etnohrafа Dominika De Lia Fliza / N. P. Paranko, T. V. Nikolaieva // Visnyk KNUТD. – 2016. – № 1. – S. 140–146.
7. Moroko O. M. Rozrobka tvorchoi kolektsii modelei zhinochoho odiahu na osnovi robіt khudozhnyka Kevina Lukbertа / O.M. Moroko, N.V. Ostapenko // Tezy dopovidi XV Vseukr. naukovoi konf. molodykh uchenykh ta studentiv [«Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi»], (Kyiv, 28-29 kvitnia 2016 r.) / Min-vo osvity i nauky Ukrainy, KNUТD. – K. : KNUТD, 2016. – S. 74.
8. Lytvynenko L. M. Dyзain kolektsii vechirnikh sukon z formotvorchymy elementamy stalahmitiv / L. M. Lytvynenko // Visnyk KhNTU. – 2017. – № 2. – S. 166–170.
9. Anry Zhydel. Pykasso / Anry Zhydel ; [per. L. Matiash]. – K. : Vydavnytstvo «Moloda hvardiia», 2007. – 458 s.
10. Ostyn Kleon. Krady kak khudozhnyk / Ostyn Kleon ; [per. s anhl. S. Fylina]. – M. : Mann. Yvanov y Ferber, 2013. – 176 s.
11. Patent na promyslovyi zrazok 36565 Ukraina. Komplekt zhinochoho odiahu / Kyslenko K. D., Vodzinska O.I. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Kyivskiy nats. un-t tekhnolohii ta dyzainu. – № s201701922 ; zaiavl. 27.10.17 ; opubl. 10.04.18, Biul. № 7.
12. Osnovy tekhnolohii eksperymentalnoho ta pidhotovcho-rozkriinoho vyrobnytstv : navchalnyi posibnyk / [Berezenko S. M., Vodzinska O. I., Bilotska L. B., Donchenko S. V.]. – K. : KNUТD, 2017. – 171 s.

Рецензія/Peer review : 21.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Галавська Л.Є.

РОЗРОБКА ТРИКОТАЖУ ДЛЯ ЗАХИСТУ РУК ВІД МЕХАНІЧНИХ НЕБЕЗПЕК

Розроблено структуру та технологію виготовлення трикотажу для засобів індивідуального захисту рук, що здатний забезпечити захист верхніх кінцівок людини при роботі з гострими різьчучими предметами. Запропонована технологія виготовлення суцільнов'язаних виробів підвищеної міцності може бути рекомендована для масового виробництва в умовах вітчизняних підприємств.

Ключові слова: засоби індивідуального захисту рук, трикотаж підвищеної міцності, опір порізу, рукавички, стійкі до порізу, захисні рукавні вироби, захист від механічних небезпек, високомолекулярна поліетиленова нитка.

S. BOBROVA

Kyiv National University of Technologies and Design

KNITWEAR DEVELOPMENT FOR HAND PROTECTION AGAINST MECHANICAL HAZARDS

The production of ultra-strong knitwear is a promising future direction for defence industries. The fields of its use are expanding year by year, in particular, it concerns knitwear products that protect against dangerous mechanical influences. Such group of products include sleeves and gloves, as personal protective equipment that protects different areas of the hands from the dangerous effects of mechanical action. The knitted structure and technology of knitwear production for personal means of hands protection is developed, which is capable of providing protection of the arms when working with sharp cutting objects. Knitting parameters are established to ensure the normal loop formation on the flat knitting machine. The developed structure is a fleecy knitwear, where the elastan yarn is laid as fleecy loops each fourth row. The raw materials for use for the manufacture of protective gloves and sleeves, which protect against various hazards of mechanical action, were analyzed. The knitting fabrics with use of ultra-high molecular weight polyethylene fiber Doyentrontex 132 tex and elastan yarn spandex 100 tex are made on double flat glove machine. This yarn give the finished products high resistance to mechanical influences and sufficient elasticity. The knitting structure parameters, breaking load, elongation on fracture under tensile stress and cut resistance are determined. The proposed technology of high strength seamless manufacturing can be recommended for mass production in the conditions of domestic enterprises.

Keywords: hand protection means, hyper strength knitted fabrics, cut-resistant, cut-resistant-gloves, protected sleeves, protection against mechanical hazards, ultra-high molecular weight polyethylene yarn.

Вступ

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) використовуються працівниками для запобігання або зменшення впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів. У даний час є дійсним положення про засоби індивідуального захисту, яке прийняте наказом № 53 державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду у 2008 році. Відповідно до Технічного регламенту поняття «засоби індивідуального захисту» – це спорядження, призначене для носіння користувачем та (або) забезпечення його захисту від одного або декількох видів небезпеки для життя чи здоров'я [1, 2].

Захисні рукавичкові вироби є одними з найбільш поширених і часто використовуваних засобів індивідуального захисту. Загрозу для рук можуть становити ризики термальні, механічні, хімічні, біологічні, електричні та ін. [3]. Типи рукавиць залежать від виду небезпеки під час виконання певних видів робіт. Наприклад, рукавиці для захисту від загальних виробничих забруднень і механічного впливу, від підвищених температур та вогню, віброзахисні рукавиці з внутрішнім гелевим шаром для зниження дії вібрацій тощо. Присутність двох або кількох ризиків одночасно викликає необхідність певної комбінації захисних характеристик рукавичок. До виробів для захисту рук, що підлягають обов'язковій сертифікації в Україні, належать рукавиці для захисту: від механічного впливу, підвищених температур, знижених температур, кислот і лугів, нафти і нафтопродуктів, вібрації, електричної напруги. Нормативними документами України регламентовано загальні вимоги до захисних рукавиць [3].

Виробництво надміцного трикотажу є перспективним напрямком, оскільки сфери його використання з кожним роком розширюються, зокрема це стосується трикотажних виробів, що захищають від небезпечних механічних впливів. До такої групи виробів відносять рукавичкові вироби, як засіб індивідуального захисту, що захищає різні ділянки рук від небезпечних впливів механічної дії.

Постановка задачі

Захисні рукавичкові вироби призначені для захисту долоні, зап'ястя, передпліччя від ударів, порізів, проколів, вібрацій або тертя при роботі з гострими інструментами та різними матеріалами (скло, метал, кераміка та ін.). За видом асортименту засоби індивідуального захисту рук від різних факторів поділяються на: рукавиці, рукавички, напіврукавички, напальчники, надолонники, напульсники, нарукавники, налокітники (рис. 1) [3, 4].

Сфера використання спеціальних захисних рукавичних виробів від різних негативних механічних впливів досить широка. Це – автомобільна, скляна, металургійна, харчова промисловість, де робітники працюють на лісопилках, металорізючих станках, виконують обробку або завантаження-розвантаження листового заліза, скла, при розробці м'яса та риби [5].

Використання рукавичок завжди викликає певні обмеження в русі руки і пальців. Однак, в ситуаціях, коли руки можуть піддаватися впливу небезпечних виробничих факторів або небезпечних

середовищ, які не можна виключити іншими способами, використання захисних рукавичок стає необхідністю. Використовуючи сучасні технологічні розробки, виробники робочих захисних рукавичок намагаються створити продукцію з урахуванням вимог ергономіки максимально комфортну в експлуатації з мінімально можливим обмеженням рухів. Проте, необхідно розуміти, що завжди буде існувати певний баланс між комфортом, ергономікою, чутливістю пальців і захисними характеристиками рукавичок. Вибір рукавичок з широким спектром і максимально можливим рівнем захисних характеристик далеко не завжди є оптимальним рішенням. У випадках, коли ризик отримати травму руки не є суттєвим, можна вибрати рукавички з менш високим захисним рівнем, але більш високою функціональністю руки [6, 7].



Рис. 1. Вироби підвищеної міцності для захисту рук від механічних ризиків

За способом виробництва рукавичкові вироби можуть бути зшиті або суцільнов'язані. Тенденції розвитку нових прогресивних технологій в'язання дозволяють виготовляти спеціальні захисні рукавичкові вироби на в'язальних автоматах за безвідходною технологією. Суцільнов'язаним виробам характерна зручність в одяганні і високий комфорт при виконанні професійних завдань.

Рукавички захисні від механічних впливів (ушкоджень) за стандартом EN-388 [4] маркуються піктограмою із зображенням щита з молотком і розташованими під ним цифрами, що означають відповідний рівень захисту:

a – стійкість матеріалу до стирання (зносостійкість), визначається кількістю циклів, необхідних для наскрізного протирання зразка;

b – стійкість матеріалу до порізу; визначається кількістю циклів, необхідних для прорізу зразка при сталій швидкості;

c – опір матеріалу роздиранню, визначається кількістю сили, необхідної для роздирання зразка;

d – стійкість матеріалу до проколу, визначається за кількістю сили, необхідної для проколу будь-яким вістрям стандартного розміру [4].

Згідно зі стандартом рукавний виріб може вважатися засобом індивідуального захисту рук від механічних впливів, якщо він витримав хоча б одне з перерахованих випробувань для рівня 1 або вище. Отже, захисні рукавичкові вироби повинні проходити випробування на стирання, поріз, роздирання і прокол. Крім того, суцільнов'язані рукавні вироби повинні відповідати вимогам стосовно ергономічних властивостей – мати достатню розтяжність, еластичність і пружність для забезпечення легкості одягання і зручності виконання роботи в умовах виробництва. Отже, завданням даної роботи є розробка технології в'язання захисного трикотажного виробу від механічних небезпек на виробництві, дослідження опору трикотажного рукава до порізу та проведення дослідження розривальних характеристик розроблених зразків трикотажу, виготовленого з використанням сировини підвищеної міцності.

Експериментальна частина

Використання таких засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), як робочі рукавички є обов'язковою нормативною вимогою охорони праці на багатьох виробництвах, у сферах обслуговування і при проведенні різних будівельних або господарських робіт. Засоби захисту рук необхідно підбирати виходячи з передбачуваних умов їх експлуатації. Залежно від типів матеріалів, використовуваних при їх виготовленні, рукавички відрізняються за своїми захисними характеристиками і відповідно сферою застосування.

На ринку засобів індивідуального захисту рук одну з найбільших груп складають рукавичкові вироби для захисту від ризиків механічного пошкодження, в яку також входять рукавички для захисту від порізів. Ризик отримання травми руки при прямому контакті з гострими або колючими предметами може бути присутнім в багатьох областях промислового виробництва: харчова промисловість, деревообробка, виготовлення скляних виробів, автомобілебудування, машинобудування, електронна промисловість і т.д. Тому кількість користувачів, що потребують таких виробів для забезпечення захисту від травмування, досить велика.

З метою підвищення ефективності роботи працівників в цехах з підвищеною небезпекою поранень та порізів рук ведеться постійна робота зі створення нових структур захисних матеріалів для засобів індивідуального захисту рук, використання нових переплетень трикотажу з вмістом ниток підвищеної міцності, асортимент яких постійно оновлюється і вдосконалюється [8].

Підвищених захисних властивостей трикотажним виробам надає застосування надміцних параарамідних, метаарамідних, вуглецевих, скляних, металевих та високомолекулярних поліетиленових ниток для їх виготовлення. Використання кожного виду сировини має свої переваги та недоліки. Так, вуглецеві та скляні нитки погано витримують навантаження згину при переробці на в'язальних машинах, значно втрачаючи свої захисні властивості. Це також стосується і арамідних ниток, хоча і в меншій мірі, вироби з них погіршують свої захисні властивості після повторного прання. Крім того, вироби з арамідних, металевих, скляних та вуглецевих ниток більш жорсткі. Застосування засобів захисту рук не повинно значно

обмежувати їх рухливість та чутливість. Безпека, міцність і зносостійкість є важливими характеристиками якісних робочих рукавичок. Тому для переробки у трикотажні вироби обрано нитки з надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ, UHMW PE в англійській літературі) через комплекс їх позитивних характеристик, що забезпечать готовим виробом необхідні показники якості.

Надвисокомолекулярний поліетилен – поліетилен з молекулярною масою більше $1,5 \cdot 10^6$ г / моль. Надвисока молекулярна маса цього полімеру визначає його унікальні фізико-механічні властивості, що різко відрізняють його від усіх інших марок поліетилену. НВМПЕ має високу міцність і ударну в'язкість в широкому діапазоні температур, від -200 до +100°C, невелику вагу, високу ударну міцність, низький коефіцієнт тертя, дуже високу хімічну стійкість до агресивних середовищ, високу світлостійкість, гарні показники по ковзанню, високу зносостійкість, стійкість до корозії [9].

Для реалізації поставленої мети використано високомолекулярну поліетиленову нитку торгової марки Doyentrontex компанії «Beijing Tong yi zhong» (Китай) для переробки її на в'язальному обладнанні у трикотажні рукавички (трубчастий виріб без пальців).

У результаті аналізу можливостей в'язального обладнання з'ясовано, що даний асортимент виробів може виготовлятися на двофонтурних плосков'язальних машинах, рукавичних та круглопанчішних автоматах. На попередньому етапі досліджень при використанні плосков'язальної машини типу ПВРК виготовлені зразки трикотажу виявилися невисокої якості, з значною нерівномірністю петельної структури та недостатньою щільністю. Крім того, виникли складнощі при переробці багатофіламентної поліетиленової нитки при виконанні операції загального скидання старих петель на нові внаслідок особливостей її структури. Спостерігалось проковзування нитки та формування остовів петель збільшеного розміру. Внаслідок цього отримана структура трикотажу виявилася рихлою та нерівномірною. Крім того, зворотньо-поступальний рух каретки та відсутність платин у процесі петлетворення не дозволяють забезпечити нормальний перебіг процесу петлетворення: багатофіламентна поліетиленова нитка низької крутки розпушується. На підставі одержаних результатів прийнято рішення переробляти даний вид сировини на обладнанні, оснащеному платинами, які забезпечують зосереджене виконання окремих операцій петлетворення, – надійно фіксують нитку під час її входження під крючок голки та формуванні петель, забезпечують її постійний натяг. Саме цей фактор сприяє безперешкодному формуванню петель мінімальної довжини [10].

У відповідності до мети роботи вироблені зразки кулірного трикотажу переплетення гладь та футероване на базі гладі з використанням поліетиленової нитки (UHMWPE) торгової марки Doyentrontex компанії «Beijing Tong yi zhong» (Китай) лінійної густини 132 текс у комбінації з еластомерною ниткою типу спандекс 100 текс на плосков'язальному автоматі ПА-8 8 класу (рис.2). Еластомерна нитка введена в структуру у вигляді футерного накиду з рапортом прокладання по ширині 3+1 в кожному четвертому петельному ряді. Дана структура забезпечує достатню щільність, пружність і надійне облягання кінцівки при високих показниках стійкості трикотажу до дії різних механічних впливів. Автомат дає можливість одержати трикотажний виріб за безшовною технологією, що забезпечує готовому виробу високі ергономічні характеристики.



Рис. 2. Лицьова та виворітна сторона трикотажу (одинарне футероване переплетення на базі гладі)

Дослідні зразки вироблено при трьох рівнях глибини кулірування ($h_k = 3,5; 3,75; 4,0$ мм), яку встановлювали шляхом зміни положення кулірного клина за допомогою відповідного регулювального гвинта. Глибина кулірування найбільшою мірою визначає форму елементів структури трикотажу та його щільність, що в свою чергу впливає на властивості готових виробів – пружність, розтяжність та стійкість до дії механічних впливів. При її виборі опиралися на нормальний перебіг процесу петлетворення й достатню щільність петельної структури.

У ході досліджень визначено параметри структури трикотажу, а саме кількість петельних стовпчиків та рядів в 100 мм трикотажу – N_c, N_p , довжину нитки у петлі – ℓ , поверхневу густину – m_s (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри структури трикотажу

№ зразка	h_k , мм	N_c , петельних стовпчиків	N_p , петельних рядів	ℓ , мм	m_s , г/м ²
1	3,5	64	70	8,6	715,2
2	3,75	60	64	9,1	569,2
3	4,0	50	60	9,6	432,8

З метою оцінки рівня захисту розроблених зразків трикотажу досліджено його механічні характеристики: розривальне зусилля по лінії петельного ряду та розривальне видовження, стійкість матеріалу до порізу. Метод визначення опору порізу текстильного матеріалу визначено за ГОСТ 12.4.141-99 [11], що полягає у визначенні сили, необхідної для руйнування випробуваної проби при постійній швидкості переміщення ріжучого елемента. Для проведення досліджень використано розривну машину маятникового типу РТ-250 з постійною швидкістю опускання нижнього затискача зі спеціальним пристосуванням для

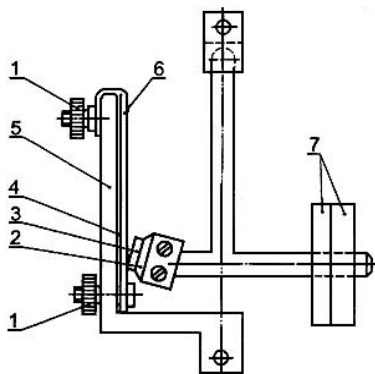


Рис. 3. Схема пристосування для визначення опору порізу: 1 - затискачі; 2 - фіксатор леза; 3 - лезо безпечної бритви; 4 - гумова підкладка; 5 - майданчик для кріплення елементарної проби; 6 - елементарна проба; 7 - притискні вантажі.

побудовані відповідні діаграми (рис. 5).

визначення опору порізу (рис. 3). Пристосування для визначення опору порізу складається з площадки для кріплення елементарної проби за допомогою гвинтів і ріжучої частини, які закріплюють відповідно на місці нижнього і верхнього затискачів розривної машини (рис. 4).

З появою наскрізного порізу за шкалою розривної машини фіксується максимальне навантаження. Опір порізу Π , Н/мм оцінювали за відношенням встановленого навантаження при прорізуванні зразка до товщини проби, що дає можливість встановити рівень стійкості розроблених трикотажних полотен до порізу гострим предметом. Крім того, досліджено величину розривального зусилля та розривального видовження трикотажу вздовж петельних стовпчиків. Одержані результати досліджень наведено у табл. 2. На підставі одержаних даних

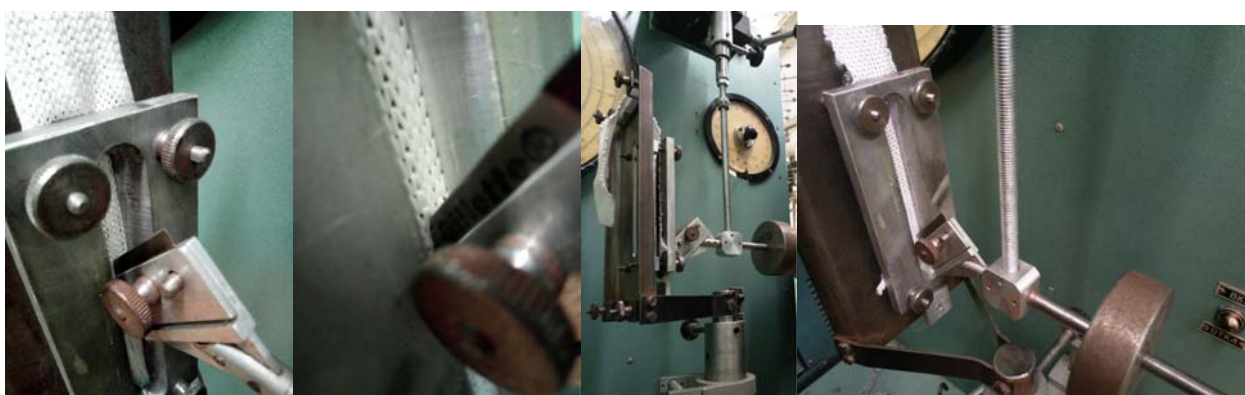


Рис. 4. Дослідження стійкості зразка трикотажу до порізу

Таблиця 2

Опір порізу та розривальні характеристики трикотажу

№ зразка	Глибина кулірування, h_k , мм	Опір порізу Π , Н/мм	Розривальне навантаження, Н	Розривальне видовження, %
1	3,5	38,1	3200	90
2	3,75	42,47	2560	70
3	4,0	42,88	1760	55



Рис. 5. Діаграми залежності механічних характеристик трикотажу від глибини кулірування

У результаті аналізу розривальних характеристик дослідних зразків трикотажу з'ясовано, що зі збільшенням глибини кулірування на 12,5% розривальне навантаження зменшується на 45%, а розривальне видовження на 38,9%. Це можна пояснити тим, що із зменшенням щільності трикотажу, відповідно зменшується кількість петельних стовпчиків, що опираються розриву. Збільшення глибини кулірування на 12,5 % призводить до зростання опору до порізу на 12,5%. Одержані результати опору трикотажу до порізу в залежності від глибини кулірування свідчать про те, що зменшення щільності трикотажу призводить до зростання коефіцієнта проковзування унаслідок прогину текстильного матеріалу під дією тиску леза ножа. Як

наслідок трикотажа рихлої структури більш ефективно чинить опір механічному впливу ріжучого зусилля леза.

Висновки

Аналіз одержаних зразків трикотажу показав, що на рукавичному автоматі, оснащеному платинами, багатофіламентна поліетиленова нитка малої крутки переробляється без ускладнень, структура трикотажу рівномірна і має високі показники міцності до дії різних механічних впливів. Запропонована структура може бути використана для виготовлення засобів індивідуального захисту від ріжучих предметів, а також гострих країв скла, кераміки та листового металу.

Література

1. Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0446-08>.
2. Про внесення змін до Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1173-09>.
3. Загальні вимоги до рукавиць : ДСТУ EN 420-2001. – [Чинний від 2003-01-07]. – К. : Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2003. – 18 с. – (Національний стандарт України).
4. Рукавички для захисту від механічних ушкоджень. Загальні технічні вимоги та методи випробування : ДСТУ EN 388:2005. – [Чинний від 2003-01-07]. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 16 с. – (Національний стандарт України).
5. Safety gloves for professionals [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2016/09/Leaflet-cut-protection-english.pdf>.
6. Перчатки для защиты от порезов. Офіційний сайт компанії «Укрпрофзахита» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/obuchayuschie-statyi/22-perchatki-dlya-zaschity-ot-porezov>
7. Офіційний сайт компанії «Teijin Aramid» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.teijinaramid.com/ru/applications/cut-protection-products-ru/>.
8. Кизимчук О. П. Аналіз асортименту захисних текстильних матеріалів / О. П. Кизимчук, Л. М. Мельник, І. В. Єрмоленко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. – 2016. – № 6 (104). – С. 115–125.
9. Офіційний сайт компанії «Beijing Tongyizhong» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.bjtyz.com/en/index.php?optionid=681&auto_id=5.
10. Шибырин К.А. Розробка трикотажу підвищеної міцності, що використовується для захисту рук від дії механічних пошкоджень / К.А. Шибырин, А.М. Габелко, С.Ю. Боброва // Тези доповідей XVI Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», 27-28 квітня 2017 р. – К. : КНУТД, 2017. – С. 306–307.
11. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты рук, одежда специальная и материалы для их изготовления. Методы определения сопротивления порезу : ГОСТ 12.4.141-99. – [Чинний від 2003-01-07]. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 6 с. – (Межгосударственный стандарт).

References

1. Polozhennia pro poriadok zabezpechennia pratsivnykiv spetsial'nym odiahom, spetsial'nym vzuttiam ta inshymy zasobamy indyvidual'noho zakhystu [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0446-08>.
2. Pro vnesennia zmin do Polozhennia pro poriadok zabezpechennia pratsivnykiv spetsial'nym odiahom, spetsial'nym vzuttiam ta inshymy zasobamy indyvidual'noho zakhystu // [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z1173-09>.
3. Zahal'ni vymohy do rukavyts': DSTU EN 420-2001. – [Chynnyj vid 2003-01-07]. – K.: Derzhavnyj komitet Ukrainy z pytan' tekhnichnoho rehuliuвання ta spozhyvchoi polityky, 2003. – 18 p. – (Natsional'nyj standart Ukrainy).
4. Rukavychky dlia zakhystu vid mekhanichnykh ushkodzen'. Zahal'ni tekhnichni vymohy ta metody vyprobuvannia: DSTU EN 388:2005. – [Chynnyj vid 2003-01-07]. – K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. – 16 p. – (Natsional'nyj standart Ukrainy).
5. Safety gloves for professionals [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2016/09/Leaflet-cut-protection-english.pdf>.
6. Perchatky dlia zaschyty ot porezov. Ofitsijnyj sayt kompanii «Ukrprofzaschyta» [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: <http://ukrprofzahyst.com.ua/ru/obuchayuschie-statyi/22-perchatki-dlya-zaschity-ot-porezov>.
7. Ofitsijnyj sayt kompanii «Teijin Aramid». [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.teijinaramid.com/ru/applications/cut-protection-products-ru/>.
8. Kyzymchuk O. P. Analiz asortymentu zakhysnykh tekstyl'nykh materialiv [Tekst] / O. P. Kyzymchuk, L. M. Mel'nyk, I. V. Yermolenko. – Visnyk Kyivs'koho natsional'noho universytetu tekhnolohij ta dyzajnu. Tekhnichni nauky. – 2016. – № 6 (104). – pp. 115-125.
9. Ofitsijnyj sayt kompanii «Beijing Tongyizhong» [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.bjtyz.com/en/index.php?optionid=681&auto_id=5.
10. Shybyryn K.A. Rozrobka trykotazhu pidvyschenoi mitsnosti, scho vykorystovuietsia dlia zakhystu ruk vid dii mekhanichnykh poshkodzen' / K.A. Shybyryn, A.M. Habelko, S.Yu. Bobrova // Tezy dopovidej KhVI Vseukrains'koi naukovoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv «Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi», 27-28 kvitnia 2017 r. – K: KNUTD, 2017. – p. 306-307.
11. HOST 12.4.141-99. Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva yndyvudual'noj zaschyty ruk, odezhdzha spetsyal'naia y materyaly dlia ykh yzgotovleniya. Metody opredeleniya soprotivleniya porezu. Mezhhosudarstvennyj standart. – M.: YPK Yzdatel'stvo standartov, 2000. – 6 p.

Рецензія/Peer review : 19.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Галаська Л.С.

АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВАРІАТИВНОГО ПРОЕКТУВАННЯ АСОРТИМЕНТНОЇ СТРУКТУРИ ЖІНОЧОЇ СПІДНИЦІ

На основі виконаного аналізу розроблена асортиментна структура жіночих спідниць за п'ятьма ознаками. Використовуючи паралельний метод кодування окремих конструктивно-композиційних рішень, розроблений класифікатор структури асортименту жіночих спідниць.

Ключові слова: спідниця, варіативне проектування, класифікаційні ознаки, асортиментна структура.

OKSANA MYKOLAYIVNA DOMBROVSKA, VIKTORIYA VASYLIVNA MYTSA
Khmelnytsky National University

ANALYTICAL GROUNDS FOR VARIATIONAL DESIGN OF THE ASSORTMENT STRUCTURE OF THE WOMEN'S SKIRT

The main prerequisite for increasing the range of products is the use of variational design, so varieties of women's skirts are analyzed and structured according to the classification criteria. The analysis of the appearance of the skirt as an element of a women's wardrobe is carried out, which allows us to conclude that the clothes, and in particular the skirt, reflect the essence of this segment of time and lifestyle. The modern style characterizes such basic qualities as simplicity and expressiveness, convenience and consistency of the form and the material. But now in modern models of skirts features are used from different historical epochs, as well as modern innovations. The assortment structure of women's skirts is developed in form, in proportions, in silhouette, by division, in a cut. The grouping of details of a female skirt according to technological similarity is executed according to their constructive features using a parallel coding method. The parallel encoding method is best suited for machining. In the process of coding, signs are assigned numeric notation. The designation code and its structure are characterized by the number of signs. To develop the classifier, the structure of the general classifier of products, that is, titling numerical designation, is used. Recording information on the design of the model with the help of figures is more compact and also provides its processing at various levels of design and technological preparation of production using computer technology.

The analysis of trends in style development was proved by the influence of the historical epoch on the design of the skirt. The generalized scheme of the range of skirts is developed, which establishes the hierarchical subordination of women's clothing and classification of the range of skirts.

Keywords: skirt, variational design, classification marks, assortment structure.

Постановка проблеми

Мода змінюється досить стрімко. Часом важко буває встежити за її останніми нововведеннями. Але ж саме мода диктує покрій, силует, ті чи інші конструкції моделей, їх колірні рішення, застосування різноманітних деталей в одязі. Саме спідниця була і залишається основним видом жіночого одягу, несучи на собі основне навантаження в гардеробі жінки. Спідниця може бути самостійною частиною жіночого гардеробу або складовим елементом сукні чи костюму та має безліч варіантів, форм, пропорцій. Структурованої інформації про різноманіття спідниць не існує, і тому виникають незручності у формуванні баз даних та розробці варіантів асортименту жіночих спідниць.

Аналіз останніх джерел

Дослідження, проведені науковцями Кисельовою М.В., Зайцевою Т.А., Брезгіною С.А. з метою удосконалення процесу проектування жіночого поясного одягу, зокрема спідниць, на стадії композиційного проектування показали, що не існує узагальненої класифікації за цим асортиментом.

Оскільки основною передумовою збільшення випуску асортименту виробів є застосування варіативного проектування, то доцільно проаналізувати різновиди жіночих спідниць і структурувати їх за відповідними класифікаційними ознаками.

Метою роботи є аналіз та вивчення різновидів конструкцій, форм жіночих спідниць з метою подальшої розробки узагальненого класифікатора структури асортименту.

Виклад основного матеріалу

Спідниця спочатку була частиною чоловічого одягу і лише після декількох століть її почали носити представниці прекрасної статі. Слово "спідниця" походить від тюркського "ubba", що означає довгополе верхнє одяння з довгими рукавами. Згідно з історією моди [1], спідниця в якості предмета гардероба жінки з'явилася п'ять століть тому. Однак, подоба спідниці вже була у древніх людей. Яскравим прикладом служить пов'язка на стегнах або одяг, які можна вважати прототипом міні-спідниці. Тільки в ті часи одяг не ділився на жіночий і чоловічий, і однакові предмети гардероба носили обидві статі.

Надалі розрізнялися такі історичні епохи, які характеризуються певним стилем як в одязі в цілому, так і в самій спідниці. Однак слід зауважити, що до теперішнього часу спідниця, в основному, не була самостійним видом жіночого гардеробу, але зате була неодмінною складовою будь-якої сукні або костюма.

Для давньогрецької епохи характерно домінування пластичних властивостей тканини у виконанні великої кількості складок, зборок і драпірувань. В основному для одягу використовувалися прямокутні шматки тканини, які з'єднувалися в певних місцях. Одяг того часу не виділяв злегка виступаючих під нею форм тіла. Найбільш відома назва такого одягу – це тога, туніка, хітон. Спідниця в цій історичній епосі за фасоном нагадувала сучасні моделі типу «сонце», «напівсонце», «дзвін» і характеризувалася вільним приляганням, великою кількістю складок і зовнішньою простотою.

Готичний стиль (середньовічна Європа XI–XIII ст.) характеризувався підкресленням вертикальних ліній по всьому одязі. Сукні жінки того часу мали значно завищену лінію талії, подовжене декольте, спідницю, зібрану в складки тільки з одного боку. Крім того, спідниця донизу значно розширювалася і нерідко переходила в шлейф різної довжини [2].

Для епохи Ренесансу характерне збільшення уваги до самої постаті. Одяг жінок стає більш розширеним донизу і більш зручним. При цьому нерідко оголюються руки і шия. Спідниця в такій сукні мала нормальну по висоті лінію талії. Однак для надання їй більш пишного і об'ємного виду в її верхню частину вставлялися металеві обручі, які в діаметрі у декілька разів перевищували величину самої талії. Низ спідниці зазвичай оброблювався вишитим малюнком по тканині.

Стиль бароко, який прийшов на зміну епосі Ренесансу (XVII -XVIII ст.) характеризувався надмірною складністю і багатошаровістю одягу. М'якість і чіткість силуету зникли. Сукні жінки виділялися контрастом і протилежністю форм: при тонкому стані – пишна, куполоподібна і в декілька шарів спідниця. Крім того, спідниці натягували на металеві корсети, а в нижню частину вставляли металеві обручі. Незважаючи на гарний зовнішній вигляд, одяг цього періоду і спідниця в тому числі, зручністю і практичністю не володіли [1, 2].

Одяг наступного стилю - рококо, занадто не змінився за формою і змістом. Однак лінії низу і верху стали ще більш контрастувати один з одним, вражаючи своєю витонченістю (ще більш пишні і багатошарові спідниці, які оброблялися всілякими бантами, мереживами.).

Наступний стиль, класицизм (середина XVII ст.) характеризувався більш строгими лініями в жіночому одязі, чіткістю пропорцій і тяжінням до простоти. Жіночі спідниці того періоду характеризувалися нормальною висотою лінії талії, більш простою і вільною формою при тій же довжині і багатошаровості [1].

Стиль ампір (XIX ст.) вніс суттєві зміни не тільки в зовнішній вигляд жіночого одягу, а й найголовніше, звільнив від корсета. Спідниця в такому костюмі мала завищену, майже під грудьми, лінію талії. Виготовлялася з напівпрозорих, легких і повітряних матеріалів – мусліну і батисту. При цьому ширина спідниці донизу штучно не розширювалась, підкреслюючи природність і стрункість фігури.

Романтизм характеризувався зміною форм і ліній фігури. За рахунок збільшення ширини спідниці стегна збільшили до неприродних розмірів, під пишними формами сукні тіло практично приховувалося від погляду. Стиль модерн (кінець XIX – початок XX ст.) знову вносить стрімку зміну форм сукні та спідниці зокрема. Матеріал, з якого виготовлялася спідниця, варіює від легкого, повітряного до важкого і прилеглого, що сприяло зоровій ілюзії збільшення нижньої частини фігури [1, 2].

Поява спідниці як предмета саме жіночого гардеробу відносять до 16 століття. Її відмінність від сукні або туніки полягала в способі кріплення: спідниця кріпилася на талії. В Іспанії перші спідниці шилися на щільному чохла з вставкою дерев'яних, або металевих обручів. Такі спідниці були вузькими в талії і розширеними донизу. Швейне обладнання тоді ще не використовувалося, і всі спідниці шили вручну. У Франції спідниці були легші, оскільки для пошиття використовувався полегшений матеріал. А пізніше мода на каркасні спідниці прийшла в Німеччину і назва «спідниця» проникло в російську мову саме з німецької.

У середині XVII століття каркасна форма виходить з моди і на зміну приходять прямі спідниці з фалдами, а також спідниці, задрапіровані з боків. У XVIII столітті з'являється новий винахід – спідниця на фіжмах (гнучкі пластинки з металу, зібрані в каркас). Пізніше в моду входять прозорі сукні, що відрізняються легкістю і м'якими лініями [1, 2].

У середині XVIII століття знову приходить мода на розкішні предмети гардероба. З'являються спідниці з криноліном (волосяним чохлам). Пізніше і вони вдосконалюються, виникають прямі спідниці, прикрашені тканиною і бантовими складками. А вже в 1913 році в моду входять звужені спідниці, винайдені Полем Пуаре. Спідниця завдовжки по щиколотку перехоплена в подолі або під колінами вузькою смужкою хутра або своєрідною "манжетною", через що в такій спідниці можна було ходити тільки дуже дрібними, акуратними кроками; щоб випадково не порвати тканину, литки перев'язували спеціальною широкою стрічкою, яка обмежувала крок [2].

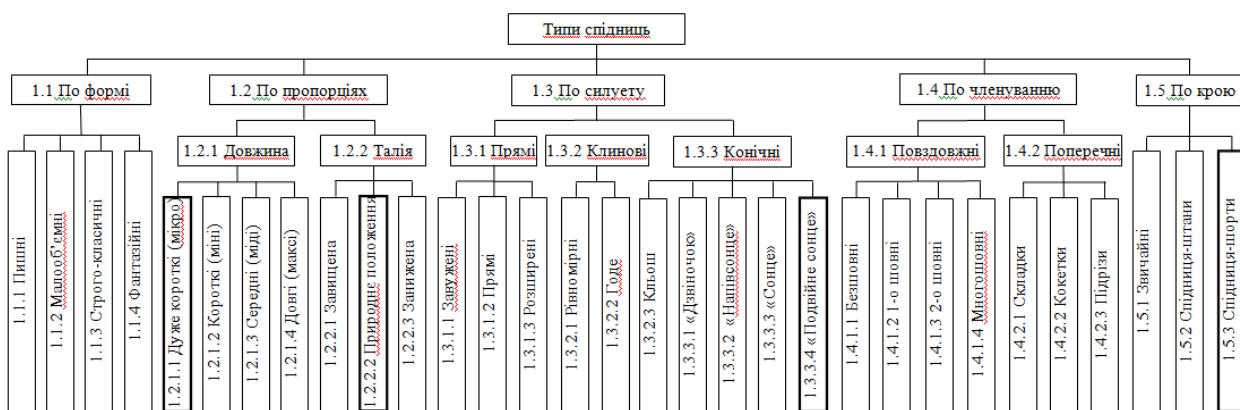


Рис. 1. Асортиментна структура жіночих спідниць

1.1 Типи спідниць по формі			
1.1.1 Пишні 1.1.1.1 американка 1.1.1.2 сонце 1.1.1.3 сонцекльош 1.1.1.4 рольтя 1.1.1.5 пачка	1.1.2 Малооб'ємні 1.1.2.1 балон 1.1.2.2 ра-ра 1.1.2.3 напівсонце 1.1.2.4 дзвіночок	1.1.3 Строго-класичні 1.1.3.1 пряма 1.1.3.2 олівець	1.1.4 Фантазійні 1.1.4.1 саронг
1.2 Типи спідниць по пропорціях			
1.2.1 Довжина			
1.2.1.1 Дуже короткі (мікро) 1.2.1.1.1 тугу	1.2.1.2 Короткі (міні) 1.2.1.2.1 пачка 1.2.1.2.2 карго 1.2.1.2.3 ра-ра 1.2.1.2.4 волан 1.2.1.2.5 скорт	1.2.1.3 Середні (міди) 1.2.1.3.1 вікел 1.2.1.3.2 олівець 1.2.1.3.3 американка 1.2.1.3.4 годе 1.2.1.3.5 шантеклер 1.2.1.3.6 кілт	1.2.1.4 Довгі (максі) 1.2.1.4.1 хіппі 1.2.1.4.2 саронг 1.2.1.4.3 спіраль 1.2.1.4.4 кльош 1.2.1.4.5 рольтя
1.2.2 Талія			
1.2.2.1 Завищена 1.2.2.1.1 карго 1.2.2.1.2 олівець 1.2.2.1.3 тюльпан	1.2.2.2 Природне положення	1.2.2.3 Занижена 1.2.2.3.1 ра-ра 1.2.2.3.2 саронг 1.2.2.3.3 кастен 1.2.2.3.4 хіппі 1.2.2.3.5 пачка 1.2.2.3.6 кілт	
1.3 Типи спідниць по силуету			
1.3.1 Прямі			
1.3.1.1 Завужені 1.3.1.1.1 олівець 1.3.1.1.2 пеплум	1.3.1.2 Прямі 1.3.1.2.1 кастен 1.3.1.2.2 букле 1.3.1.2.3 з запахом	1.3.1.3 Розширені 1.3.1.3.1 спіраль 1.3.1.3.2 ламбада 1.3.1.3.3 тетянка 1.3.1.3.4 плісе 1.3.1.3.5 хіппі 1.3.1.3.6 трапеція	
1.3.2 Клинові			
1.3.2.1 Рівномірні 1.3.2.1.1 зонтик 1.3.2.1.2 шестиклинка	1.3.2.2 Годе 1.3.2.2.1 годе		
1.3.3 Конічні			
1.3.3.1 Кльош 1.3.3.1.1 кльош 1.3.3.1.2 плісе	1.3.3.2 «Дзвіночок» 1.3.3.2.1 дзвіночок	1.3.3.3 «Напівсонце» 1.3.3.3.1 напівсонце 1.3.3.3.2 плісе 1.3.3.3.3 балон	1.3.3.4 «Сонце» 1.3.3.4.2 сонцекльош 1.3.3.4.3 плісе 1.3.3.4.4 балон
1.3.3.5 Подвійне сонце 1.3.3.5.1 рольтя			
1.4 Типи спідниць по членуванню			
1.4.1 Повздовжні			
1.4.1.1 Безшовні 1.4.1.1.1 з запахом 1.4.1.1.2 сонце 1.4.1.1.3 корегуюча нижня	1.4.1.2 1-о шовні 1.4.1.2.1 пеплум 1.4.1.2.2 кльош 1.4.1.2.3 по косій 1.4.1.2.4 напівсонце 1.4.1.2.5 олівець)	1.4.1.3.1 букле 1.4.1.3.2 олівець 1.4.1.3.3 пряма 1.4.1.3.4 напівсонце 1.4.1.3.5 тюльпан 1.4.1.3.6 балон	1.4.1.4 Багатощовні 1.4.1.4.1 мілітарі 1.4.1.4.2 годе 1.4.1.4.3 кастен 1.4.1.4.4 спіраль
1.4.1.5 Складки 1.4.1.5.1 кілт 1.4.1.5.2 мілітарі 1.4.1.5.3 ра-ра 1.4.1.5.4 сонцекльош 1.4.1.5.5 з запахом			
1.4.2 Поперечні			
1.4.2.1 Складки 1.4.2.1.1 пряма	1.4.2.2 Кокетки 1.4.2.2.1 тюльпан 1.4.2.2.2 олівець 1.4.2.2.3 дзвіночок 1.4.2.2.4 сонце 1.4.2.2.5 трапеція	1.4.2.3 Підрізи 1.4.2.3.1 пряма 1.4.2.3.2 олівець 1.4.2.3.3 годе	
1.5 Типи спідниць по крою			
1.5.1 Звичайні 1.5.1.1 трапеція, 1.5.1.2 всі вище сказані	1.5.2 Спідниця-штани 1.5.2.1 жуп-кюлот	1.5.3 Спідниця-шорти 1.5.3.1 скорт	

Рис. 2. Класифікатор структури асортименту жіночих спідниць

У 20 столітті мода на спідниці знову змінюється: корсети скасовуються, скорочується довжина. Знаменита Коко Шанель вводить в моду елегантні спідниці середньої довжини, а також плісировані спідниці. Використовуючи оверлоки, ціна на які на той час була доступною, модельєри виготовляли спідниці з різними вставками. Пізніше, після Другої Світової, з'являється знаменитий костюм з твіду з вузькою спідницею [1].

Зробивши короткий екскурс у світ жіночої моди, можна говорити про те, що одяг, і зокрема спідниця, відображає суть даного відрізка часу і стиль життя. Сучасний стиль характеризує такі основні якості, як простота і виразність, зручність та узгодженість форми і матеріалу. Хочеться підкреслити, що в даний час в сучасних моделях спідниць використовуються риси як з різних історичних епох, так і сучасні нововведення.

Аналізуючи історичний розвиток, журнали, класифікації виділено такі типи спідниць: за формою, пропорціями, силуетом, членуванням, кроєм (рис. 1).

При класифікації швейних виробів враховують призначення, вихідну сировину і матеріали, конструкцію і характер оздоблення, спосіб виробництва, розміри. Групування деталей за технологічною подібністю здійснюється за їхніми конструктивними ознаками. Тому, саме конструктивні ознаки покладені в основу формування коду та групування виробів за цим кодом. Для окремих конструктивно-композиційних рішень виробів найбільш прийнятним є паралельний метод кодування. У цьому випадку ознака кодового значення кожної із частин не залежить від значень інших ознак. Паралельний метод кодування найкраще пристосований до машинної обробки. У процесі кодування ознакам присвоюють числові позначення. Код позначення і його структура характеризуються кількістю ознак.

Для розробки класифікатора використано структуру загального класифікатора продукції, тобто десятинне цифрове позначення. Запис інформації про конструкцію моделі за допомогою цифр є більш компактним і забезпечує також її обробку на різних рівнях конструкторсько-технологічної підготовки виробництва з використанням комп'ютерних технологій.

На основі асортиментної структури (рис. 1) розроблений класифікатор жіночих спідниць (рис. 2).

Висновки

Таким чином, проведений аналіз напрямків стильового розвитку довів вплив історичної епохи на формування конструкції спідниці. Розроблена узагальнена схема асортименту спідниць, яка встановлює ієрархічну підпорядкованість виробів жіночого поясного одягу та класифікатор структури асортименту спідниць.

Література

1. Захаржевская Р.В. История костюма: От античности до современности / Захаржевская Р.В. – 3-е изд., доп. – Москва : Рипол: Классик, 2005. – 306 с.
2. Плаксина Э. История костюма. Стили и направления : учебное пособие / Эльвира Плаксина, Людмила Михайловская, Виктор Попов / под ред. Э. Плаксиной. – Москва : Academi", 2008. – 232 с.

References

1. Zaharzhetskaya R.V. Istoriya kostyuma: Ot antichnosti do sovremennosti : 3-e izd., dop. – Moskva: Ripol: Klassik, 2005. 306 s.
2. EH'vira Plaksina, Lyudmila Mihajlovskaya, Viktor Popov. Istoriya kostyuma. Stili i napravleniya: uchebnoe posobie/ pod red. EH. Plaksinoj. Moskva: Academi", 2008. 232 s.

Рецензія/Peer review : 26.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.

Рецензент: к.т.н., проф. Домбровський А.Б.

ДОСЛІДЖЕННЯ АСОРТИМЕНТУ СУЧАСНОГО ДОМАШНЬОГО ЖІНОЧОГО ОДЯГУ ЗА ДАНИМИ ІНТЕРНЕТ-МАГАЗИНІВ

Розглянуто питання упорядкування сучасного асортименту одягу підгрупи домашнього жіночого одягу за даними ряду інтернет-магазинів. Для відтворення структури асортиментної матриці інтернет-магазинів одягу, сформовано товарний класифікатор за чотирма рівнями. Встановлено найбільш поширені класи товарів в інтернет-магазинах одягу, а також визначено найбільш характерні види одягу у товарній групі "Домашній жіночий одяг". За результатами дослідження розроблена систематизація асортименту виробів домашнього жіночого одягу за п'ятьма ознаками.

Ключові слова: домашній одяг, одяг для сну і відпочинку, інтернет-магазини; товарна група, асортимент одягу; систематизація домашнього жіночого одягу.

O. A. DITKOVSKA
Khmelnytsky National University

RESEARCH OF THE ASSORTMENT OF MODERN HOME WOMEN CLOTHING FOR INFORMATION FROM THE INTERNET SHOP

It has been found out that the issues of designing or optimizing the range of home clothing are not well-investigated by scientists, and therefore such studies are actual. The purpose of the work was to study and analyze the assortment of modern women's home clothing on the basis of data of online stores. For research, sixty online clothing stores have been selected. To recreate the structure of the assortment matrix of the studied online stores, is formed the classification of products on four levels. The study allowed the establishment of the main categories of goods that these stores usually identify, as well as identify the most typical types of clothing in the "Women's Home Clothing" product group. It has been established that six categories of products represent domestic women's home clothing in 67.3% of online stores. These are kinds of products such as bathrobes, capes, night shirts, peignoir, combinations, pyjamas, home dresses, tunics, sundresses, kits for home and sleep, as well as pants, capri pants, leggings, breeches or shorts. Another 3 categories of products, namely: velour suits for home and recreation, T-shirts, and socks, determine the range of home-made clothing in 87% of online stores. Also, the most characteristic filters for sorting and quickly choosing shoulder clothes are defined: clothing size, price, brand and main color, which are distributed in 46% of stores. The article proposes for the first time the systematization of women's clothing for home and recreation. Homemade women's clothing is classified by five signs. Clothes can be festive (for reception of guests) as well on a each day. By the main purpose, it is possible to allocate home-made clothes for rest (for nature, clothes for the beach), for work (for example, on a private plot), for sleeping (sets, pajamas, night shirts, t-shirts, etc.), for sports, for home (clothes for a bath and sauna, bathrobes, aprons, etc.) and clothing for romance (erotic linen, pajamas, body, stockings, etc.). To systematization entered the clothes subclasses included the top dressing-blouse range, underwear, hosiery and gloves. The assortment is presented in the form of product categories that are highlighted in most online clothing stores. In general, home-made clothes are all-season, so depending on the fabrics from which it is made, it is proposed to select clothing warm and easy. The obtained information is valuable for planning the assortment of home clothing at sewing enterprises, as well as to improve as well as to optimize the marketing policy of the enterprise through Internet technologies.

Keywords: home clothes, clothes for sleeping and rest, online shops; goods group, assortment of clothes; systematization of home women's clothing.

Постановка проблеми

Сучасний ринок готового одягу є надзвичайно насиченим різноманітними виробами, що за своїм художньо-композиційним рішенням та призначенням стануть доречними у будь якій ситуації, задовольняють найвибагливіший смак, а також запропоновані у різних цінових категоріях. Зазвичай виробники зосереджуються на виготовленні побутового одягу – це і спортивні костюми, і одяг у діловому стилі, і вишуканні вечірні чи коктейльні сукні, різноманітний верхній одяг і, звичайно, натільна білизна – все те без чого не можливо уявити гардероб сучасної жінки або чоловіка.

Однак і в цьому надзвичайному різноманітті є категорія одягу повсякденного призначення, що завжди залишалася на другому плані – це домашній одяг, або як його тепер частіше позиціонують – "одяг для дому, відпочинку і сну".

Проблема формування оптимальної структури асортименту, рівня якості та конкурентоспроможності групи одягу для дому, відпочинку і сну складна, багатогранна і надзвичайно актуальна. Основним ключовим моментом, що ускладнює процес дослідження асортименту домашнього одягу є те, що для кожного з нас "домашнім" може стати будь-який вид одягу, і це залежить від ситуації, відчуття стилю, смаку, особистих вподобань і звичок. Конкретних рекомендацій та нормативних вимог щодо проектування сучасного домашнього одягу не існує, оскільки не конкретизовано асортимент, утилітарні вимоги та умови функціонування одягу такого призначення.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій

В процесі пошуку інформації та проведення літературного аналізу встановлено, що питання проектування чи оптимізації асортименту сучасного жіночого домашнього одягу практично не досліджувалися на науковому рівні.

Російськими науковцями Тарасовою О.П. і Яньшиною М.М. у праці [1] розглянуто питання розробки комплектів домашнього жіночого одягу із використанням пуху оренбурзької кози, що забезпечить в необхідних зонах додатковий зігрівальний ефект і стане виконувати функцію лікувально-профілактичного характеру. В

роботі запропоновано композиційне рішення комплектів одягу для жінок різних вікових груп із можливістю трансформації за рахунок знімних утеплювальних деталей, що виготовлені із трикотажного пухового полотна.

Дослідити варіанти домашнього одягу та запропонувати оптимальні проектно-конструкторські рішення спробували і білоруські науковці Ботезат Л.А. і Терешкова К.В. [2]. Ними було проведено соціологічне опитування серед 100 жінок різного віку (від 16 до 65 років), за яким встановлено, що найбільш бажаними видами одягу для дому є: топи і шорти (28%), сукня і халат (25%), штани і джемпер (20%). Також встановлено рейтинг вимог споживачів до домашнього одягу: комфорт і зручність (27%), гарний зовнішній вигляд одягу (23%), використання натуральних матеріалів (19%), практичність (13%), сучасність (12%); доступність ціни (6%).

Проблеми, що виникають при проектуванні одягу для сну та відпочинку досліджували в своїх роботах українські науковці Цимбал Т.В. і Кокоріна Г.В. Вони наголошують, що проектування такого одягу є актуальним, але ускладнене через відсутність необхідної інформації. Зокрема при проектуванні одягу для сну відсутня розширена класифікація одягу для сну; не має систематизації видів одягу даного призначення і вимог до них; не вистачає інформації з динамічних показників для визначення системи конструктивних прибавок тощо [3]. У статті [4] розглянуто історичний аспект виникнення жіночого одягу для купання. Авторами наголошується, що проектування сучасного одягу для морського відпочинку має вирішуватися комплексно та з точки зору формування цілісного гардеробу, адже відпочинок біля моря передбачає різноманітне дозвілля: купання, заняття спортом, екскурсійний туризм та вечірні розваги.

Конкурентні умови сучасного виробництва одягу та світові тенденції в індустрії моди обґрунтовані постійною зміною умов та прискоренням темпу життя суспільства в цілому, явним переглядом життєвих пріоритетів для різних груп населення, формуванням нових вимог до одягу у споживачів. Саме тому, проектування одягу для дому, відпочинку і сну, на сьогодні, є надзвичайно актуальним та затребуваним.

Інформація, що надається діючими у Україні міждержавними та національними стандартами, що визначають терміни, визначення та асортимент швейних виробів [5, 6] є неузгодженою. Зокрема, у стандарті ГОСТ 17037-85, дію якого продовжено до 1 січня 2019 року, дано визначення домашнього одягу у наступній редакції: "Побутовий одяг для роботи і відпочинку в домашніх умовах" [5, с.3]. Водночас в ДСТУ 2027–92 поняття "домашній одяг" виключено з переліку термінів [6]. Очевидним стає той факт, що державні стандарти та прийнята в швейній промисловості класифікація одягу, не дають повної інформації про асортимент та номенклатуру видів домашнього одягу, що запропонована сьогодні на ринку товарів вітчизняним споживачам.

Сучасний ринок домашнього одягу наповнений продукцією різної якості, реалізується одяг як вітчизняних, так і зарубіжних виробників (як правило, це Туреччина, Польща, Італія і Росія). Багато відомих світових брендів одягу (Donna Karan, Calvin Klein, Stella McCartney, Emilio Pucci та інші) мають свої лінії домашнього одягу і регулярно випускають сезонні колекції. В Україні кількість виробників домашнього одягу зростає з кожним роком, що свідчить про перспективність даного сегменту ринку. Відомими вітчизняними виробниками одягу для дому, сну і відпочинку є: Дім Модної Білизни "Ажур", м. Хмельницький; Бренд "Kleo", м. Київ; ВАТ "Калина", м. Червоноград; виробники українського текстилю "Skif Textile", м. Одеса та "ТМ Kosta", м. Комсомольск; бренди "Balcony garment", м. Львів; "German Wolf", м. Київ; "Мамин дом" і "Anabel Arto" із м. Харків; "Zen Wear", м. Дніпро та багато інших.

Сьогодні величезний вибір домашнього одягу можна знайти не лише в магазинах роздрібною торгівлі, а й у інтернет-магазинах. Як стверджує автор [7], Інтернет – новий засіб комунікації, який являє собою комунікаційну модель "багато хто – багато кому". Переваги, що надаються Інтернетом, не обмежуються лише функціями комунікації, а включають також можливість укладання угод, проведення платежів і здійснення купівлі – продажу, завдяки цьому Інтернет набуває масштабів глобального електронного ринку. Інтернет, як інструмент систем маркетингу і логістики зумовлює значний вплив на ефективність просування продукції підприємств, що наразі ефективно застосовують вітчизняні швейні підприємства з метою удосконалення збутової діяльності.

Статистика свідчить [7], що найбільш популярними товарами, які найчастіше продаються в Інтернеті, є одяг та взуття (32 %), техніка й електроніка (29 %), товари для дому і саду (18 %), спортивні товари (11 %), а також продукти, які відносяться до сегменту краси і здоров'я (7%). Три чверті користувачів мережі – українці віком до 29 років (45 %), та до 44 р (26 %), при чому 52% користувачів складають саме жінки. Тому цілком обґрунтованим є процес швидкого збільшення кількості інтернет-магазинів з продажу одягу, адже он-лайн торгівля сьогодні має цілий ряд переваг.

З урахуванням вище сказаного, дослідження номенклатури та глибини асортименту жіночого домашнього одягу найкраще виконувати за даними саме інтернет-магазинів, що, на сьогоднішній день, надають найбільш вичерпну та відносно згруповану, за товарними позиціями, інформацію.

Отже, **метою роботи** стало дослідження і упорядкування асортиментного різноманіття сучасного домашнього жіночого одягу. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання: 1) сформувати вибірку інтернет-магазинів, що реалізують жіночий домашній одяг; 2) визначити асортимент домашнього жіночого одягу в загальному переліку видів одягу; 3) розробити систематизацію асортименту виробів домашнього жіночого одягу.

Виклад основного матеріалу

Для проведення аналізу здійснено вибір інтернет-магазинів, що, серед іншого товару, пропонують до продажу домашній жіночий одяг. Загальна вибірка склала 60 сайтів, які умовно можна поділити на 3

групи: 1) група магазинів домашнього одягу та текстилю (14 шт.), 2) інтернет-магазини одягу (32 шт.), 3) група магазинів білизни і купальників (14 шт.).

В загальній структурі більшості інтернет-магазинів товар пропонується за категоріями в чіткій ієрархічній структурі, що може містити від одного (для вузько направлених магазинів домашнього одягу) до чотирьох рівнів (для магазинів різного одягу). Перелік всіх видів товару, що продаються в магазині називається асортиментною матрицею [8]. Для відтворення структури асортиментної матриці досліджуваних інтернет-магазинів, сформовано товарний класифікатор за чотирма рівнями.

На першому рівні класифікатора, залежно від формату магазину, виділяється клас товару, що в розумінні споживача, об'єднано загальним функціональним призначенням [8]. Зазвичай, в інтернет-магазинах одягу розділення категорій виконується за статево-віковим фактором. Залежно від спеціалізації магазину, також виділяються категорії "Товари для дому" чи "Домашній текстиль", "Посуд", "Жіноча білизна", "Домашній одяг" чи "Одяг для дому і сну", а також "Взуття", "Акcesуари", "Косметичні засоби для тіла" та ряд інших.

На другому рівні виділяється товарна група. Поділ відбувається за призначенням одягу, сезонністю або стилем. Зазвичай тут виділяють такі групи одягу як: "Верхній одяг", "Одяг для спорту", "Еротична білизна", "Для бані і сауни", "Одяг для вагітних", "Пляжна мода", "Великі розміри", "Карнавальні костюми", "Вечірній одяг", "Офісний стиль" та інші.

На третьому рівні подається товарна категорія – в нашому випадку це види і різновиди одягу, що схожі за кроєм та мають спільне призначення. Глибина асортименту тут представлена, брендами, різними фасонами одягу, кольором, різними матеріалами, варіантами комплектації та ціновими категоріями.

Четвертий рівень класифікатора описує товарну одиницю, що містить характеристику конкретної моделі одягу. Інформація доповнюється фотографіями виробу на моделі у 3-4 ракурсах, описом зовнішнього вигляду, складом матеріалів, варіантами кольорових рішень даної моделі, розмірами, що є в наявності та таблицею вимірів з параметрами типової фігури, ціною виробу, а також можуть пропонуватися схожі за дизайном чи призначенням варіанти одягу.

Тобто, процес он-лайн пошуку бажаної моделі одягу для споживача передбачає наступні дії: завантажити сайт інтернет-магазину, перейти 2-3 рази за посиланнями обираючи клас, товарну групу та товарну категорію, а також скористатися фільтрами, що конкретизують вимоги покупця до бажаної моделі одягу.

Аналіз досліджуваної вибірки інтернет-магазинів показав, що за кількістю виділених класів товарів на першому рівні магазини можна умовно поділити на чотири групи:

- перша група – виділяє від 1 до 4 класів товарів і таких магазинів 12 шт. (20%);
- друга група – 5 ÷ 7 класів, до якої входять 26 магазинів (43,3%);
- третя група – 8 ÷ 10 класів товарів, 18 магазинів (30%);
- четверта група – 11÷14 класів, 4 інтернет-магазини одягу з найбільшим асортиментом (6,7%).

Встановлено, що найчастіше інтернет-магазини одягу розділяють товар за класами: "Жіночий одяг" (27 шт.), "Домашній одяг" (25 шт.), "Дитячий одяг" (22 шт.), "Чоловічий одяг" (20 шт.), "Товари для дому" або "Домашній текстиль" (19 шт.), "Жіноча білизна" (13 шт.), а також категорія "Халати" – 12 магазинів.

Оскільки структура інтернет-магазинів є різною, на діаграмі рис. 1 наведено перелік усіх класів і товарних груп, що виділяються у досліджуваних магазинах.

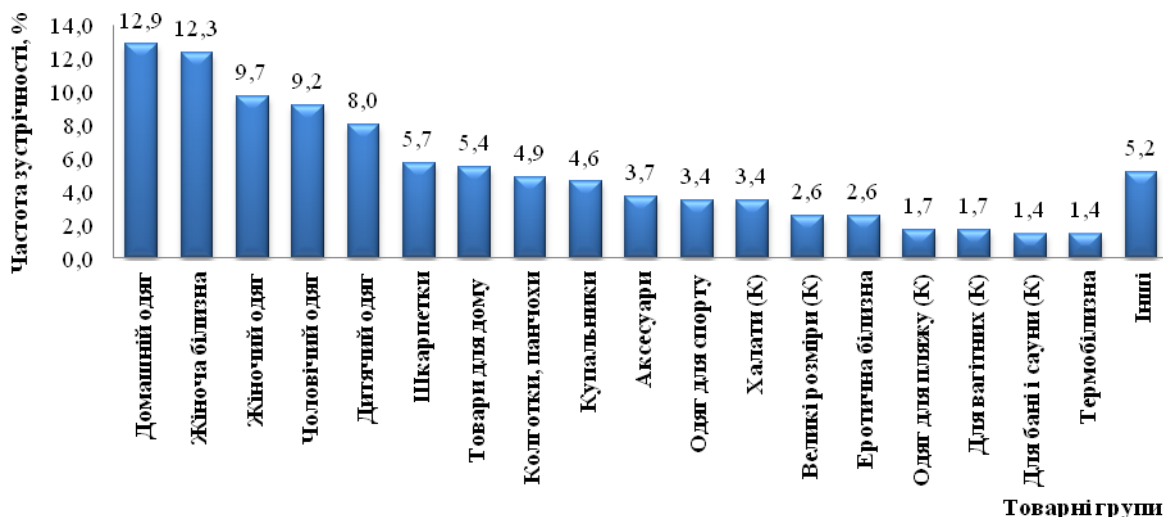


Рис. 1. Діаграма розподілу найбільш поширених товарних груп одягу, що виділяють інтернет-магазини

На рис. 1 до групи інших віднесено такі категорії, що зустрілися лише на окремих сайтах, це "Жіночий трикотаж" (4 сайти), "Верхній жіночий одяг" (4 сайти), "Одяг для сну" (4 сайти), "Український стиль" (3 сайти), "Весільний каталог" (3 сайти).

Варто відмітити, що з таким видом одягу як "халат" не все однозначно. В ході аналізу стало зрозуміло, що халати деякі магазини (3,4%) виділяють як окремий клас, що позначено на рис. 1 літерою (К),

однак основна більшість (71,7%) магазинів відносять до групи "Домашній одяг", ще 8,3% магазинів пропонують халати в загальному переліку продукції. Також є ще 4 товарні групи, а саме: "Великі розміри", "Одяг для пляжу", "Для вагітних", "Для бані і сауни" що в інтернет-магазинах виділяються на різних рівнях: і як групи товарів, і як товарні категорії або як фільтри для уточнення пошуку.

На наступному етапі дослідження більш детально було розглянуто асортимент виробів групи "Домашній одяг" для жінок. За кількістю товарних категорій у цій групі магазини можна умовно поділити на: магазини вузького асортименту (від 0 до 5 категорій виробів) – 32 шт. (53,3%), та магазини широкого асортименту (від 6 до 9 категорій виробів) – 28 шт. (46,7%).

Перелік найбільш поширених категорій одягу в групі "Домашній одяг" для жінок із зазначеним відсотком від загальної зустрічності у вибірці представлено на діаграмі рис. 2. До групи інших віднесено категорії: "Для вагітних" (3,8%), "Великі розміри" (1,6%), "Для бані і сауни" (1,4%), "Для пляжу" (1,4%).

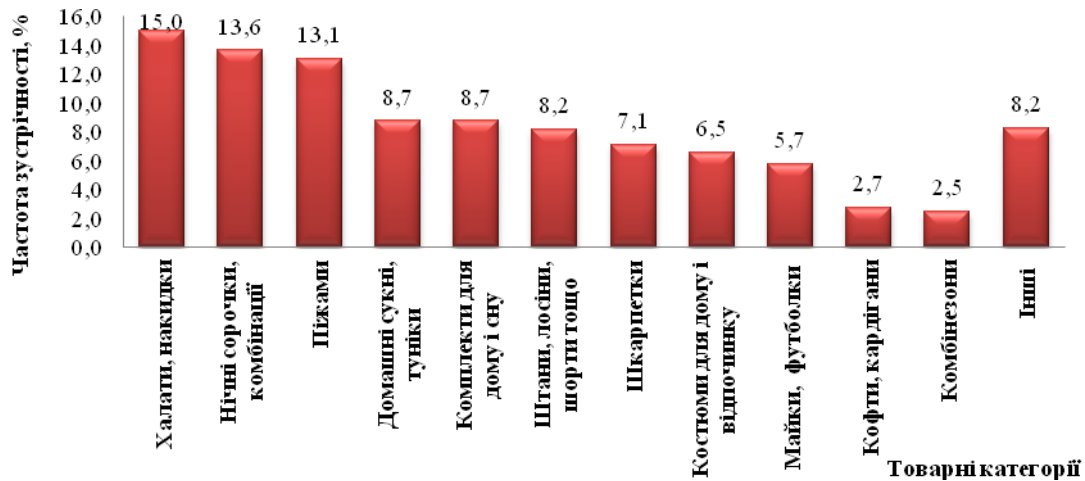


Рис. 2. Діаграма розподілу товарних категорій одягу у групі "Домашній одяг" для жінок

Аналізуючи діаграму на рис. 2, видно, що шість категорій виробів представляють домашній жіночий одяг у 67,3% інтернет-магазинів. Це такі види виробів як халати, накидки, нічні сорочки, пеньюари, комбінації, піжами, домашні сукні, туніки, сарафани, комплекти для дому і сну, а також штани, лосіни, капрі, легінси, бріджи чи шорти. Ще 3 категорії виробів, а саме: велюрові костюми для дому і відпочинку, майки, футболки, а також шкарпетки, визначають асортимент домашнього одягу у 87% інтернет-магазинів. В товарній категорії "Шкарпетки" часто пропонують і домашнє взуття, тапочки.

Відомо, що принцип роботи інтернет-магазинів передбачає широке використання так званих "фільтрів" – ознак, за якими пошук бажаного товару здійснюється дуже швидко. При включенні декількох різних фільтрів виконується сортування товарів, і ті що не відповідають вибраним ознакам – відсіюються автоматично. Застосування фільтрів при виборі є дуже корисним явищем, перш за все, для покупця, оскільки допомагає заощадити час та швидко зорієнтуватися у всьому каталозі виробів.

Тому далі було досліджено види та кількість фільтрів, що застосовуються в інтернет-магазинах одягу. Аналіз виконувався за фільтрами, що були доступні при пошуку моделей плечового одягу. За цією ознакою інтернет-магазини можна умовно поділити на 3 групи: 1) ті, що пропонують від 0 до 4 фільтрів (24 шт.); 2) ті, що пропонують від 5 до 9 фільтрів (25 шт.); 3) ті, що пропонують від 10 до 15 фільтрів (11 шт.).

Перелік фільтрів, що пропонуються для споживача при виборі моделей плечового одягу он-лайн та їх частота зустрічності представлена на діаграмі рис. 3.

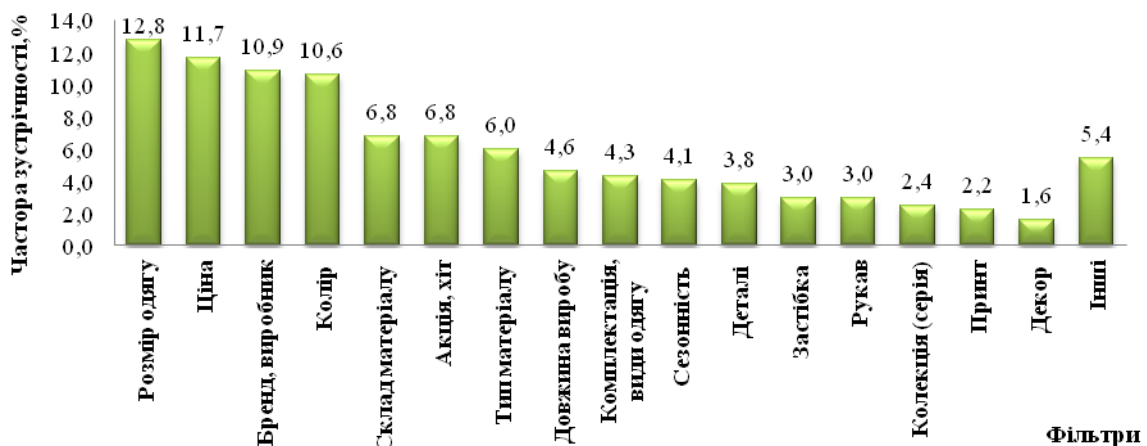


Рис. 3. Діаграма частоти зустрічності фільтрів активних при виборі моделей жіночих халатів

З діаграми рис. 3 видно, що найбільш зустрічними (46 %) є такі чотири фільтри: розмір одягу, ціна, бренд чи фірма-виробник і основний колір. Ще додаткові 6 фільтрів, такі як: склад матеріалу, тип матеріалу, довжина виробу, види одягу або комплектація, сезонність, акція (хіт, новинки), зустрічаються у 78,5% інтернет-магазинів. Решта фільтрів в більшості випадків виділяються у магазинах одягу та текстилю, і майже не розглядаються у магазинах модної білизни. В поодиноких інтернет-магазинах також пропонувалися такі фільтри як: стать (2,72%), за призначенням (1,9%); стиль (1,09%); силует (0,54%), що на діаграмі винесено у групу інші.

Узагальнюючи результати проведеного дослідження та опрацьованої інформації, автором розроблена систематизація асортименту виробів домашнього жіночого одягу, та представлена у вигляді схеми на рис. 4. Домашній жіночий одяг класифіковано за п'ятьма ознаками: за умовами експлуатації (ситуацією); за основним призначенням; за предметним призначенням, за асортиментом та за властивостями матеріалів.

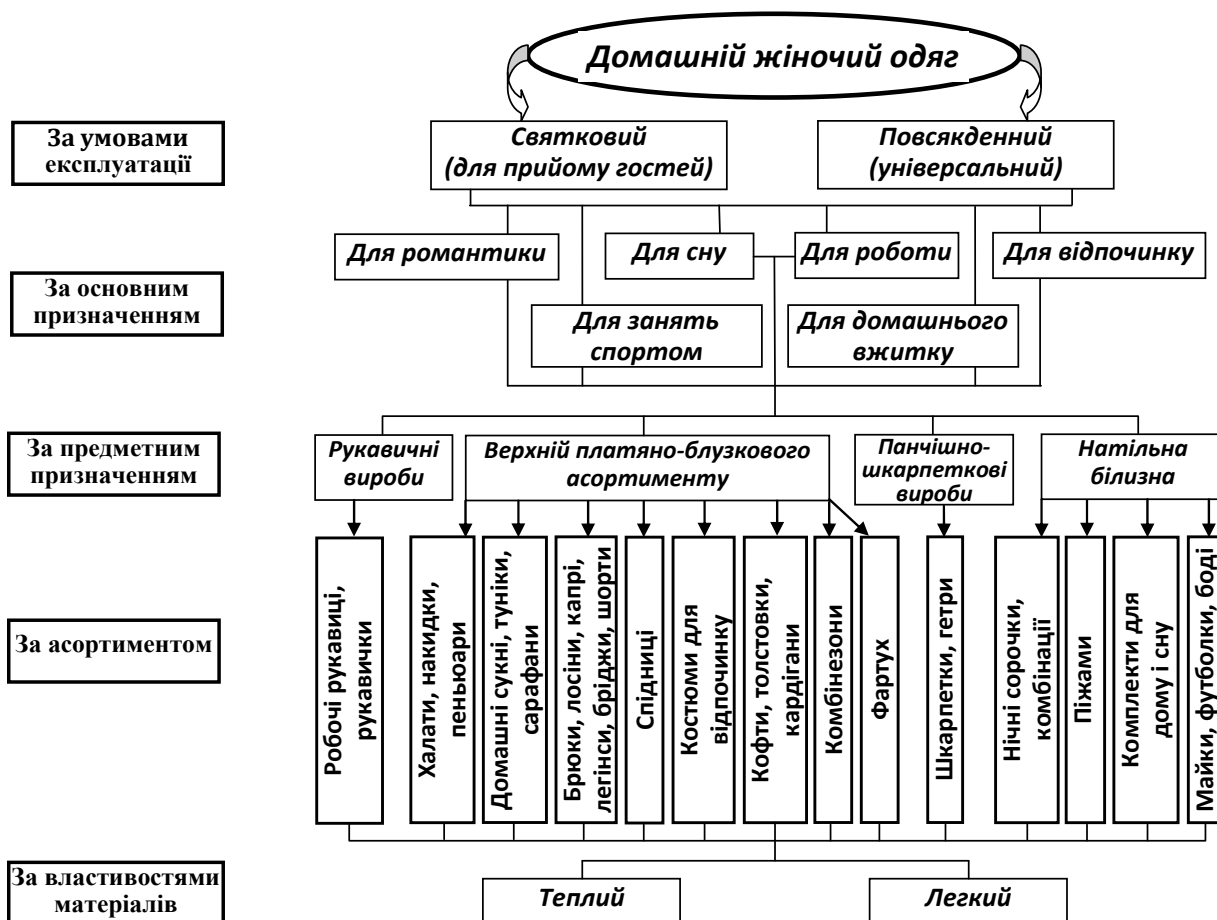


Рис. 4. Систематизація асортименту виробів домашнього жіночого одягу

Домашній жіночий одяг може бути святковим (для прийому гостей) і повсякденним. За основним призначенням можна виділити домашній одяг для відпочинку (на природі, пляжний одяг), для роботи (наприклад, на присадибній ділянці), для сну (різноманітні комплекти і гарнітури, піжами, нічні сорочки, футболки тощо), для занять спортом, для домашнього вжитку (одяг для бані і сауни, халати, пеньюари для ранкового туалету, фартухи тощо) та одяг для романтики (еротична білизна, пеньюари, боді, панчохи тощо). За предметним призначенням до систематизації ввійшов одяг наступних підкласів: верхній платтяно-блузкового асортименту, натільна білизна, панчішно-шкарпеткові та рукавичні вироби. Асортимент представлено у вигляді товарних категорій, що виділяються у більшості інтернет-магазинів одягу. В цілому домашній одяг є всесезонним, тому за матеріалами, з яких він виготовляється запропоновано виділити одяг теплий і легкий.

Висновки

В статті проаналізовано асортимент виробів домашнього жіночого одягу за даними 60-ти інтернет-магазинів. Для відтворення структури асортиментної матриці досліджуваних інтернет-магазинів одягу, сформовано товарний класифікатор за чотирма рівнями.

Досліджено асортимент виробів що, зазвичай, відносять до товарної групи "Домашній одяг" для жінок. Встановлено що у 67,3% домашній одяг представлено шістьма товарними категоріями, до яких входять: халати, накидки, пеньюари; нічні сорочки, комбінації, піжами; домашні сукні, туніки, сарафани; комплекти для дому і сну; а також штани, лосіни, капрі, легінси, бріджі чи шорти. Ще 3 групи виробів, а

саме: велюрові костюми для дому і відпочинку; майки, футболки; а також шкарпетки, формують асортимент домашнього одягу у 87% інтернет-магазинів.

Аналіз фільтрів, що досліджувалися при пошуку моделей плечового одягу показав, що у 70% відсотків магазинів пропонується сортування за ознаками: розмір, ціна, бренд (виробник), основний колір, склад і тип матеріалу, довжина виробу, акції.

Запропоновано вперше розробку систематизацію асортименту виробів домашнього жіночого одягу, що може стати основою для розробки класифікації. Надана в статті інформація є цінною для планування асортиментної політики швейного підприємства, що працює в даному секторі, а також для оптимізації збутової політики підприємства за допомогою Інтернет технологій.

Література

1. Тарасова О.П. Дизайн-проектирование женской домашней одежды с использованием пуха оренбургской козы [Электронный ресурс] / О.П. Тарасова, М.М. Яньшина // Архитектон: известия вузов. – № 45. – 2014. – С. 194–202. – Режим доступа : http://archvuz.ru/2014_1/18
2. Ботезат Л. А. Разработка проектно-конструкторских решений домашней одежды / Л. А. Ботезат, К. В. Терешкова // Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції "Сучасний стан легкої і текстильної промисловості: інновації, ефективність, екологічність", Херсон 12–17 вересня 2017 р. / Херсонський національний університет. – Херсон, 2017. – С. 36–37.
3. Годунок Т. І. Особливості проектування жіночого спіднього одягу для сну / Т. І. Годунок, Т. В. Цимбал // Тези доповідей XV Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів "Наукові розробки молоді на сучасному етапі". Т. 1: Секція "Нові наукові технології виробництва матеріалів, виробів широкого вжитку та спеціального призначення" : 28-29 квітня 2016 р. — К. : КНУТД, 2016. — С. 45.
4. Кокоріна Г. В. Дослідження історії формування асортименту спеціального одягу для відпочинку / Г. В. Кокоріна, С. Н. Морозова // Технології та дизайн. – 2012. – № 2 (3).
5. Изделия швейные и трикотажные. Термины и определения : ГОСТ 17037-85. – Чинний від 1986-07-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 14 с. – (Міждержавні стандарти України).
6. Вироби швейні й трикотажні. Терміни та визначення : ДСТУ України 2027–92. – Чинний від 1993-01-01. – К. : Держстандарт України, 1992. – 20 с.
7. Щербак В. Г. Удосконалення збутової діяльності з використанням інтернет-технологій / В. Г. Щербак, А. О. Ткаченко // Актуальні проблеми інноваційного розвитку кластерного підприємництва в Україні : зб. ст. за матеріалами Всеукр. наук.-практ. конф. (30 березня 2017 р., м. Київ). – К. : КНУТД, 2017. – С. 158–163.
8. Синяєва І.М. Категорійний менеджмент [Електронний ресурс] / І.М. Синяєва, О.Н. Романенкова, С.В. Земляк, В.В. Синяєв // Коммерческая деятельность : учебник для бакалавров. – М. : Юрайт, 2014. – Режим доступа : http://stud.com.ua/73443/marketing/kategoriyniy_menedzhment

References

1. Tarasova O.P. Dizayn-proyektirovaniye zhenskoy domashney odezhdy s ispol'zovaniyem pukha orenburgskoy kozy [Yelectronniy resurs] / O.P. Tarasova, M.M. Yan'shina // "Arkhitkton: izvestiya vuzov". - № 45. - 2014. - S. 194-202. - Rezhim dostupu: http://archvuz.ru/2014_1/18
2. Botezat L. A. Razrabotka proektno-konstruktorskykh resheniy domashney odezhdy / L. A. Botezat, K. V. Tereshkova // Tezy dopovidey III Mizhnarodnoy naukovoye-praktychnoy konferentsiyi "Suchasnyy stan lehkooy i tekstylnoy promyslovosti: innovatsiyi, efektyvnost, ekolohichnist", Kherson 12–17 veresnya 2017 g. / Khersonskyy natsionalnyy universyitet. – Kherson, 2017. – S. 36–37.
3. Hodunok T. I. Osoblyvosti proektuvannya zhinochoho spidnoho odyahu dlya snu / T. I. Hodunok, T. V. Tsymbal // Tezy dopovidey XV Vseukrayinskoy naukovoy konferentsiyi molodykh uchenykh ta studentiv "Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi". T. 1 : Sektsiya "Novi naukomistki tekhnolohiyi vyrobnytstva materialiv, vyrobiv shyrokooho vzhytuku ta spetsialnoho pryznachennya" [Tekst] : 28-29 kvitnya 2016 g. — K. : KNUVD, 2016. — S. 45.
4. Kokorina H. V. Doslidzhennya istoriyi formuvannya asortymentu spetsialnoho odyahu dlya vidpochynku [Tekst] / H. V. Kokorina, S. N. Morozova // Tekhnolohiyi ta dizayn. - 2012. - № 2 (3).
5. Yzdeleya shveyne y trykotazhnye. Termyny y opredelenyya : HOST 17037-85. – Chynnyy vid 1986-07-01]. – M. : Yzdatel'stvo standartov , 1988. – 14 s. (Mizhderzhavni standarty Ukrayiny)
6. Vyroby shveyni y trykotazhni. Terminy ta vyznachennya : DSTU Ukrayiny 2027–92. – Chynnyy vid 1993-01-01. – K.: Derzhstandart Ukrayiny, 1992. – 20 s.
7. Shcherbak V. H. Udokonalennya zbutovoyi diyalnosti z vykorystanniyam internet-tekhnolohiy / V. H. Shcherbak, A. O. Tkachenko // Aktualni problemy innovatsiynoho rozvytku klasternoho pidpryyemnytstva v Ukrayini : zb. st. za materialamy Vseukr. nauk.-prakt. konf. (30 bereznya 2017 r., m. Kyviv). - K. : KNUVD, 2017. - S. 158-163.
8. Synyayeva I.M. Katehoriynny menedzhment [Elektronnyy resurs] / Y.M. Synyayeva, O.N. Romanenkova, S.V. Zemlyak, V.V. Synyayev // Kommercheskaya deyatelnost: uchebnyk dlya bakalavrov. - M.: Yurayt, 2014. - Rezhym dostupu: http://stud.com.ua/73443/marketing/kategoriyniy_menedzhment

Рецензія/Peer review : 29.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.

Рецензент: к.т.н., проф. Кушевський М.О.

УДК 687.64.061.2

А.К. КАРМАЛІТА

Хмельницький національний університет

ТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ В СУЧАСНОМУ ІНТЕР'ЄРІ ЖИТЛА

Бурхливий розвиток техніки в світі за останні роки і десятиліття призвів і до розвитку технічних систем, які застосовуються в сучасних людських помешканнях. Створюючи дизайн інтер'єру сучасних житлових приміщень, дизайнер повинен не тільки володіти інформацією про особливості конструкції таких систем, а й детально знати їх технічні характеристики. Стаття присвячена аналізу технічних та естетичних характеристик основних сучасних технічних систем для житлових приміщень.

Ключові слова: інтер'єр, електрообутова техніка, дизайн, освітлення, сантехніка.

А.К. KARMALITA

Khmelnitsky National University

TECHNICAL SYSTEMS IN THE MODERN HOUSING INTERIOR

The rapid development of technology in the world in recent years and decades has led to the development of technical systems that are used in modern human habitation. By creating an interior design of modern living space, the designer must not only possess information about the design features of such systems, but also know their technical characteristics in detail. The article is devoted to the analysis of technical and aesthetic characteristics of the main modern technical systems for residential premises. Design today is a leading technology in the creation of any things, ranging from home and heating appliances to carpets, cabinet and soft furniture and accessories. Therefore, the designer of the subject environment must work in the creative community with engineers, designers, scientists, technologists, economists, doctors, to have a coherent idea of the future product, to predict the possible negative effects of using such a product by a person. He must have a wide horizons and a beautiful aesthetic taste, to be able to think creatively, to have analytical and voluminous methods of searching for a form, to know the design and finishing materials well. Thus, the designer takes a prominent place in the field of artistic design, in the design of complex products, where the technical and aesthetic aspects are equally important. Modern design is not only the realization of material human needs, but also the materialization of spiritual values, the implementation in the design form of the essence of the content of the era. Design arises in the conditions of industrial production and replication of forms in order to achieve conformity of these forms to human parameters.

Key words: interior, electrical appliances, design, lighting, plumbing.

Вступ

Більшу частину свого життя людина проводить у житлових чи виробничих приміщеннях. Мабуть, саме цим пояснюється наша цікавість до дизайну й якості предметів інтер'єрного призначення: санітарно-технічного обладнання, приладів для освітлення помешкання, аксесуарів, побутової техніки, меблів тощо. Бурхливий розвиток техніки в світі за останні роки і десятиліття привів і до розвитку технічних систем, які застосовуються в сучасних людських помешканнях. Створюючи дизайн інтер'єру сучасних житлових приміщень, дизайнер повинен не тільки володіти інформацією про особливості конструкції таких систем, а й детально знати їх технічні характеристики. Сучасний дизайн – це не тільки реалізація матеріальних людських потреб, але і матеріалізація духовних цінностей, реалізація в дизайнерській формі суті змісту епохи. Дизайн виникає в умовах промислового виробництва і тиражування форм, але з метою добитись відповідності цих форм параметрам людини.

Відмінність речей, створених дизайнером, полягає в тому, що вони орієнтовані не тільки на технічну і технологічну доцільність, але і на пластичну виразність. Таким чином дизайнер забезпечує продуктивну взаємодію між людиною і машинною формою так, щоб обидві сторони процесу не втратили б своїх суттєвих рис, одночасно виявляючись здібними до такої взаємодії.

З історії дизайну відомо, що якраз із технічного, промислового дизайну почався той, різноманітний, багатофункціональний дизайн, який охопив всі сфери життя людини. І як видно на сьогоднішній день промисловий дизайн є багатофункціональною діяльністю дизайнерів і є унікальним, потужним та ефективним збудником естетичної і благородної активності суспільства.

Виклад основного матеріалу

1. *Електрообутова техніка.* Розширення масового виробництва і споживчого ринку призвело до відділення цінності продукту виробництва від його утилітарної функції. Все більшого значення набуває додаткова соціально-культурна споживча цінність продукту, обумовлена якістю, привнесеною працею дизайнера. Ця цінність визначається додатковими зручностями, комфортністю. Особливо все це яскраво виражено в сучасній електрообутовій техніці.

Сучасна електрообутова техніка, яка значно полегшила, або навіть частково замінила неprestижну роботу прачок, куховарів, прибиральниць, дала можливість якісно зберігати продукти харчування і т.п., завдяки дизайнерам органічно вписується в сучасний інтер'єр людського житла і стала справжнім другом людини. Людина отримує задоволення не тільки від якісної, багатофункціональної і надійної роботи електрообутової техніки, а й від її зовнішнього вигляду. Все це завдяки естетичній функції дизайну. Для окремо взятої людини сприйняття продуктів дизайну безпосередньо пов'язано з естетичним задоволенням. Річ чудова, річ жахлива. Дизайн свідомо творить красоту. Установка на створення естетичної привабливості до виникнення дизайну була прерогативою виключно мистецтва, але при цьому утилітарне приходить в діалектичну єдність з естетичним. Естетична функція дизайну обов'язкова в будь-якому предметі дизайну, саме з її допомогою вдається досягнути гармонічної єдності користі і привабливості.



Рис. 1. Зразки сучасної електропобутової техніки

Дизайн сучасної електропобутової техніки ставить перед собою задачі, пов'язані не тільки з вирішенням проблем матеріального оснащення побуту, але і доволі конкретні задачі, направлені на активізацію пасивного споживання. Дизайн допомагає людині відчути насиченість власного існування різноманіттям можливостей сучасної електропобутової техніки.

Ще однією функцією дизайну є виконання зворотного зв'язку між виробництвом такої техніки та її споживанням. Масштаб масового виробництва електропобутової техніки дозволяє уникнути кризи перевиробництва, якщо споживач готовий замінити один вид техніки, що в нього є, на інший через «малозначні» відмінності, створені дизайнерами. В даному випадку конкурують не стільки самі виробники, скільки їх дизайнерська новизна. Наприклад, навіть такі незначні на перший погляд речі, як заміна холодильника на виріб іншого кольору, який органічніше вписується в новий інтер'єр, чи інше розміщення морозильної камери; заміна пральної машини з вертикальним завантаженням на машину з горизонтальним завантаженням чи більш зручною панеллю управління і т.п.

2. *Телерадіоапаратура.* Неможливо уявити сучасний побут без телевізора чи іншої звукової техніки. Працюючи над дизайном телевізора, який гармонійно впишеться в інтер'єр, дизайнери шукали натхнення у витворах мистецтва. Живопис і скульптура втілюють розкіш, надихають, привертають увагу, але водночас сприймаються як природний елемент оздоблення, органічно доповнюючи помешкання. Базова гармонія та ефектний візуальний акцент – ці протилежності поєднуються в концепції гармонійного мінімалізму, що лежить в основі дизайну сучасного телевізора. Яким є ключове завдання дизайну? Насамперед, телевізор має зручно й природно вписатися в інтер'єр, органічно доповнюючи помешкання й повсякденне життя людей. Такою є концепція гармонійного мінімалізму – поєднання простої конструкції з теплими приємними формами й текстурами.



Рис. 2. Настільна і настінна конструкції телевізорів

Призначення об'єктів дизайну не вичерпується їх прикладними характеристиками: наприклад, картини та скульптури не виконують в інтер'єрі жодної функції, але надають життєвому простору особливої енергії. Нова концепція гармонійного мінімалізму змінює уявлення про пристрої, наділяючи їх характеристиками предметів мистецтва. Телевізор перетворюється з об'єкта, що порушує загальний дизайн, на важливий елемент інтер'єру навіть у вимкненому стані. Наприклад елегантну підставку телевізора BRAVIA® утворюють металеві бруси простої геометричної форми, що лише в кількох точках спираються на поверхню. Унікальне поєднання прихованої напруги й рівноваги в цьому дизайні нагадує вишуканий витвір мистецтва. Підставка у вигляді перевернутої літери V – надійна опора для телевізора, на яку можна встановити аудіопанель. До того ж її ретельно продуманий дизайн доповнить будь-який інтер'єр.

Цей OLED-телевізор BRAVIA складається лише з двох панелей, одна з яких слугує підставкою, а друга – екраном. Заокруглені краї панелей візуально полегшують конструкцію та підкреслюють лаконічний

дизайн. Майстерно виготовлений посуд, крісло на замовлення або інші предмети ручної роботи пасують вам ідеально. Дизайнери BRAVIA® прагнули передати ці особливості в низці деталей, як-от заокруглені кути в рамці телевізора та корпусі аудіопанелі, що пом'якшують форму пристроїв.

Завдяки інноваційному дизайнерському рішенню задня панель телевізора BRAVIA® доповнює елегантний дизайн пристрою. Вентиляційні отвори та кришки для роз'ємів складаються в стильну геометричну конструкцію. Аудіопанель виконано з унікальної комбінації матеріалів, що створюють особливу естетичну гармонію між дизайном інтер'єру та оздобленням пристрою, підкреслюючи його функціональність.

3. *Опалювальні прилади.* Будь-який будинок або квартиру можна назвати затишною, тільки в тому випадку, якщо в ній підтримується нормальна температура для життєдіяльності людини. Значення теплового комфорту важко переоцінити для працездатності, здоров'я, настрою людини. Щоб створити і підтримувати в приміщенні комфортні умови, інженери придумали безліч опалювальних систем і приладів. Існує два способи передачі тепла від батарей опалення – конвекція і випромінювання.

Конвекція, природна або примусова, – це прискорений нагрів повітря, що стикається з розвиненою обігріваною поверхнею батареї опалення. На принципі примусової конвекції побудована робота конвекторів - опалювальних приладів, в конструкцію яких вбудований вентилятор. Конвектори здатні дуже швидко обігріти приміщення, але є у них і істотний недолік. Активна конвекція повітря, подібно пилососа, занадто сушить повітря і захоплює велику кількість пилу, що не сприяє здоровому мікроклімату в будинку. Зазвичай цей вид опалювальних приладів використовують в проблемних приміщеннях з великими площами скління, де звичайні опалювальні прилади порушують гармонію інтер'єру.

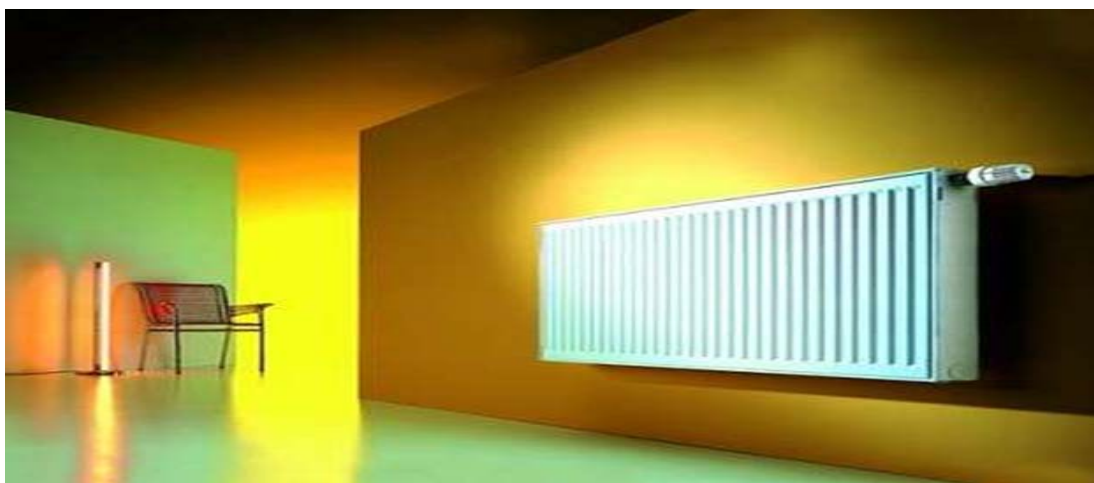


Рис. 3. Розміщення обігрівального приладу на стіні

Випромінювання – це природний нагрів повітря приміщення поверхнею опалювального приладу – радіатора, що має підвищену теплоємність і температуру. На випромінювання припадає близько 60% теплової енергії, що віддається радіаторами в простір приміщення, і лише решта 40% припадають на природну конвекцію за рахунок руху повітряних мас в приміщенні. Таким чином, радіаторне опалення, завдяки мінімальній конвекції гарячого повітря, екологічно і найближче до опалення пічного або теплою підлогою. Існують також і комбіновані опалювальні прилади – панельні радіатори-конвектори. Радіатори опалення будуть нормально виконувати свої функції, якщо будуть адаптовані до умов експлуатації в кожному конкретному випадку. Для кожного типу радіаторів існують свої обмеження, саме на це слід звертати увагу при виборі опалювальних приладів. Якщо неправильно вибрати радіатори для опалювальної системи, то можна в процесі експлуатації зіткнутися з такими проблемами:

- корозія внутрішніх поверхонь;
- нестійкість до гідравлічних ударів;
- хімічна, електрохімічна корозія;
- розрив радіаторів,
- газоутворення в алюмінієвих батареях.

Основні правила для вибору опалювальних приладів наступні:

1. Потужність батарей опалення підбирають, виходячи з наступного нормативу обігріву приміщення: 100 Вт на квадратний метр площі кімнати з одним вікном і однією зовнішньою стіною.

2. Для кімнати з двома вікнами і двома зовнішніми стінами до розрахункової потужності слід додати ще 30%.

3. Якщо радіатори будуть закриватися декоративними панелями, до отриманої величини потужності доведеться додати ще 15%.

4. Також по 5–10% додають до розрахункової величини теплової потужності батарей, якщо вони розташовуються в нішах або вікнах кімнати і виходять на північ або північний схід. При збігу кількох факторів додаткові відсотки підсумовують.

4. *Люстри і світильники.* Світловий дизайн інтер'єру – це багаторівнева система з різних освітлювальних приладів, яка одночасно вирішує функціональні, естетичні і емоційні завдання відповідно

до призначення того чи іншого приміщення. Дизайн освітлення кімнат є важливим етапом в плануванні інтер'єру. У кухні, наприклад, нас в першу чергу цікавить функціональний аспект освітлення “робочого місця”. Точно так само нам не байдужий і ступінь освітленості письмового столу в кабінеті. У спальні або вітальні на перший план виступають питання естетики і створення сприятливої для відпочинку емоційної атмосфери. Взагалі, в дизайні освітлення, при всій його раціональності, утримується якийсь елемент магії. Світло – настільки сильний і пластичний “матеріал”, що з його допомогою можна “виліпити” будь-який образ предмета. Стосовно до інтер'єру, роль світла зростає надзвичайно. Проектування дизайну освітлення кімнат – це один з найважливіших моментів роботи дизайнера під час створення різних образів інтер'єру.



Рис. 4. Варіант вибору люстри у відповідності до інтер'єру

Найголовнішою умовою комфорту в освітленні приміщень є правильне співвідношення кількості світильників, які можна розрахувати на одну точку залежно від потужності. Розрахункові нормативи рекомендують встановлювати на 5 м² прилади сумарною потужністю до 75 кВт.

Висновки

Дизайн сьогодні — це провідна технологія у створенні будь-яких речей, починаючи від побутової техніки та приладів для опалення приміщень і завершуючи килимами, корпусними й м'якими меблями та аксесуарами. Тому, дизайнер предметного середовища повинен працювати у творчій співдружності з інженерами, конструкторами, ученими, технологами, економістами, лікарями, мати цілісне уявлення про майбутній виріб, прогнозувати можливі негативні наслідки від користування таким виробом людиною. Він повинен мати широкий кругозір і гарний естетичний смак, уміти творчо мислити, володіти аналітичними й об'ємними методами пошуків форми, добре знати конструктивні й оздоблювальні матеріали. Таким чином, дизайнер посідає чільне місце в галузі художнього конструювання, у проектуванні складних виробів, де технічна й естетична сторони однаково важливі.

Література

1. Быстрова Т.Ю. Вещь. Форма. Стиль: Введение в философию дизайна / Быстрова Т.Ю. – Екатеринбург, 2001.
2. Моросова Н.К. Философия дизайна: социально-антропологические проблемы / Моросова Н.К. – Екатеринбург, 2001.
3. Глазычев В.Л. Дизайн, как он есть [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.soob.ru/n/2006/3/2/0/.
4. Ефимова Н.И. Функции дизайна в жизни человека, общества, бытия / Ефимова Н.И. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.taby27.ru.

References

1. Byistrova T.YU. Vesch. Forma. Stil: Vvedenie v filosofiyu dizayna / Byistrova T.YU. – Ekaterinburg, 2001.
2. Morosova N.K. Filosofiya dizayna: sotsialno-antropologicheskie problemy / Morosova N.K. – Ekaterinburg, 2001.
3. Glazyichev V.L. Dizayn, kak on est [Elektronnyiy resurs]. – Rejim dostupa : www.soob.ru/n/2006/3/2/0/.
4. Efimova N.I. Funktsii dizayna v jizni cheloveka, obschestva, byitiya / Efimova N.I. [Elektronnyiy resurs]. – Rejim dostupa : www.taby27.ru.

Рецензія/Peer review : 27.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гордєєв А.І.

УДК 504.4.054.(477.43)

О.О. ЄФРЕМОВА, Н.Г. МІРОНОВА, О.П. МАТЕЮК, А.О. ДЯЧУК, С.М. ШЕВЧЕНКО
Хмельницький національний університет**ЕКОЛОГО-ГІГІЄНИЧНА ОЦІНКА СТАНУ Р. ПІВДЕННИЙ БУГ У МЕЖАХ
ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА ПЕРІОД 2013–2017 РР.**

Проаналізовано якісні та кількісні показники поверхневих вод басейну р. Південний Буг у межах Хмельницької області, на основі яких проведено еколого-гігієнічну оцінку якості води за період 2013–2017 рр. Визначено класи якості води та динаміку змін якості води. Досліджено та проаналізовано основні чинники впливу на якість поверхневих вод басейну р. Південний Буг у межах Хмельницької області та розроблено рекомендації щодо покращення якості поверхневих вод басейну річки.

Ключові слова: якість поверхневих вод, еколого-гігієнічна оцінка, Південний Буг, Хмельницька область.

OLHA OLEKSIIIVNA IEFREMOVA, NATALIYA GHENNADIIVNA MIRONOVA, OLESJA PETRIVNA MATEJUK,
ANDRII OLEKSANDROVYCH DIACHUK, SERHIJ MYKOLAJOVYCH SHEVCHENKO
Khmelnytskyi National University**ECOLOGICAL-HYGIENIC ASSESSMENT OF THE PIVDENNYI BUH RIVER
WITHIN THE KHMELNITSKY REGION OVER THE PERIOD OF 2013-2017**

In modern conditions a surface water of sushy experiences considerable anthropogenic influence as a result of which their natural state significantly changes and the possibility of use of separate water objects for economic and drinking needs is considerably limited. As drinking water supply in Ukraine is mainly due to surface water, objective information on the status of water bodies, established on the basis of hygienic and environmental criteria, becomes extremely important and actual. The qualitative and quantitative indicators of surface waters of the Pivdennyi Buh basin within the Khmelnytskyi region on the basis of which the ecological and hygienic estimation of water quality for the period of 2013-2017 has been carried out has been analyzed. By average block and integral indices, the quality of the waters of the Pivdennyi Buh River within the Khmelnytskyi region is good, of acceptable quality. By the worst block and integral indices the water quality is satisfactory, poorly contaminated. The most significant influence on the formation of surface water quality in the Pivdennyi Buh River within Khmelnytskyi regio is made by toxic (copper) and tropho-saprobological (ammonium salts, nitrites, nitrates, phosphates, BSCs) of the blocks. Particularly acute effects of pollutants appear on the streams of the watercourse, which are exposed to sewage. There is a clear tendency of deteriorating water quality in recent years. As a result of the analysis, we can testify that the ecological state of the Pivdennyi Buh River does not meet the norms for certain indicators and deteriorates with each passing year. In order to improve the ecological status of the river, it is necessary to implement technological and organizational measures for the revival and improvement of the sanitary and ecological status of the river and its catchment basin.

Key words: surface water quality, ecological-hygienic assessment, Pivdennyi Buh, Khmelnytskyi region.

Постановка проблеми

В сучасних умовах поверхневі води суші зазнають значного антропогенного впливу, в результаті якого суттєво змінюється їх природний стан та значно обмежується можливість використання окремих водних об'єктів для господарсько-питних потреб. Оскільки питне водопостачання України здійснюється в основному за рахунок поверхневих вод, вкрай важливою й актуальною стає об'єктивна інформація щодо стану водних об'єктів, встановлена на основі гігієнічних та екологічних критеріїв.

Аналіз останніх джерел

Інтегральним показником стану водних екосистем є якість води, яка оцінюється за кількісними і якісними характеристиками. Хімічний склад природних вод є інтегральною характеристикою якості води. Він формується у результаті взаємодії ряду природних (фізико-географічних, геологічних, фізико-хімічних, біологічних) та антропогенних чинників. Значною мірою на формування якості води впливає господарська діяльність людини (скиди стічних вод промислових підприємств, комунального господарства, скиди з сільськогосподарських угідь, енергетика тощо). Оцінка стану поверхневих вод найчастіше здійснюється за коефіцієнтом забрудненості води (K_z) [1] та екологічним індексом якості води (I_e) [2, 3]. Під час оцінки якості води водних об'єктів, які використовуються чи можуть бути використані для централізованого питного водопостачання застосовується ДСТУ 4808:2007 «Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання» [4].

Питання комплексної оцінки якості води розроблялись багатьма вченими не тільки в Україні (Коненко А.Д., Альокін О.А., Оксїюк О.П., Жукінський В.С., Романенко В.Д., Яцик А.В., Хільчевський В.К., Масенко О.Г., Денисова О.І.), а і за кордоном (Хартон, Труїтт, Гарсія, Браун) [5]. Встановлення та використання конкретних кількісних значень екологічних нормативів якості води щодо окремих водних об'єктів створює передумови для управління їх екологічним станом. **Метою роботи** є еколого-гігієнічна оцінка стану р. Південний Буг в межах Хмельницької області за період з 2013 року по 2017 рік.

Виклад основного матеріалу

Південний Буг бере початок на Волино-Подільській височині поблизу с. Холодець Хмельницької області і впадає в Дніпро-Бузький лиман Чорного моря. В межах області довжина річки складає 140 км. Річки басейну Південного Бугу займають 4610 км², або 22,4 % території області. Гідрографічна сітка басейну Південного Бугу в межах області нараховує 1046 водотоків загальною довжиною 2493 км [6].

Хімічний склад поверхневих вод басейну р. Південний Буг відзначається переважанням іонів Ca^{2+} та HCO_3^- , лужною реакцією рН до 8,0, завищеною жорсткістю, низькою мінералізацією (до 0,5 г/дм³). Таким

характеристикам відповідає переважна кількість проб по всіх об'єктах моніторингу басейну р. Південний Буг протягом багатьох років [6]. Сьогодні спостерігається чітка тенденція зміни якості води на різних ділянках річки. Якщо 10 років тому найгіршими показниками якості води характеризувалися лише нижні ділянки басейну, то сьогодні забрудненими можна вважати також верхні та середні ділянки.

Оскільки близько 80 % площі басейну р. Південний Буг використовується як джерело централізованого питного водопостачання, до того ж, саме в межах Хмельницької області формується її гідрохімічний склад, еколого-гігієнічну оцінку її стану в межах Хмельницької області ми проводили за ДСТУ 4808:2007 [4]. Згідно з [4] класифікація якості поверхневих вод України – джерел централізованого питного водопостачання – охоплює 80 показників, які застосовують для оцінювання якості питної води згідно з санітарним законодавством, і має сім окремих груп (блоків): I блок – 4 органолептичні показники; II блок – 17 загально-санітарних показників хімічного складу води; III блок – 6 гідробіологічних показників; IV блок – 6 мікробіологічних показників; V блок – 2 паразитологічних показники; VI блок – 9 показників радіаційної небезпеки; VII блок – 36 пріоритетних токсикологічних показників хімічного складу води (з них 25 – неорганічних та 11 – органічних компонентів) [4].

Обрана класифікація системно враховує екологічні та гігієнічні показники складу і властивостей води, надаючи перевагу гідроекологічним критеріям, які більшою мірою відповідають вимогам екологічної безпеки водойм. Згідно цієї класифікації виділяють чотири класи якості (1–4) поверхневих вод з такими характеристиками: 1 клас – відмінна; бажана якість води; 2 клас – добра, прийнятна якість води; 3 клас – задовільна, прийнятна якість води; 4 клас – посередня, обмежено придатна, небажана якість води [4].

При проведенні еколого-гігієнічної оцінки якості води р. Південний Буг в межах Хмельницької області в розрахунках використовували найбільш репрезентативні показники якості води I блоку (завислі речовини, запах, кольоровість), II блоку (сухий залишок (мінералізація), сульфати, хлориди, магній, жорсткість (твердість) загальна, лужність, водневий показник, азот амонійний, азот нітритний, азот нітратний, фосфор фосфатів, розчинений кисень, БСК_п, окиснюваність перманганатна (KMnO₄), окиснюваність біхроматна (ХСК) та пріоритетні показники VII блоку (залізо загальне, мідь, марганець, СПАР).

За вказаними показниками визначали середні значення блокових індексів якості води обчисленням середньоарифметичного значення класів (1–4), яким відповідають середньорічні величини усіх зазначених показників у межах кожного блоку. Найгірші значення блокових індексів якості води визначали за найгіршими величинами (з найбільшим номером класів) серед інших значень показників даного блоку. Маючи середні й найгірші значення блокових індексів якості води, визначали їх належність до певного класу та підкласу якості води.

Для проведення еколого-гігієнічної оцінки якості поверхневих вод обраховували середньорічні (I_{пнт-сер}) та найгірші річні (I_{пнт-нг}) показники по 5 створах, розташованих вздовж течії р. Південний Буг в межах Хмельницької області (Мар'янівське водосховище, смт Чорний острів; Хмельницьке водосховище, вище м. Хмельницький; с. Копистин, нижче м. Хмельницький; Меджибізьке водосховище, смт Меджибіж; Щедрівське водосховище, смт Летичів) за даними моніторингу Хмельницького обласного управління водних ресурсів (рис. 1) [6].

За величиною визначених інтегральних індексів встановлювали клас та підклас якості води, відповідно до еколого-гігієнічної класифікації. Приклад результатів розрахунків інтегральних індексів для оцінки якості вод р. Південний Буг за 2017 рік наведено в таблиці 1.

Для оцінки динаміки змін якості води в р. Південний Буг здійснювали розрахунки інтегральних індексів за середніми та найгіршими показниками якості води за період з 2013 року по 2017 рік. Відповідні класи та підкласи якості води по створах спостережень на р. Південний Буг в межах Хмельницької області за період 2013–2017 рр. наведено в таблиці 2.

За середніми блоковими й інтегральним індексами якості вод р. Південний Буг в межах Хмельницької області – добра, прийнятною якості. Динаміку змін середніх інтегральних індексів якості води в р. Південний Буг за період з 2013 року по 2017 рік по створах спостережень наведено на рис. 2.

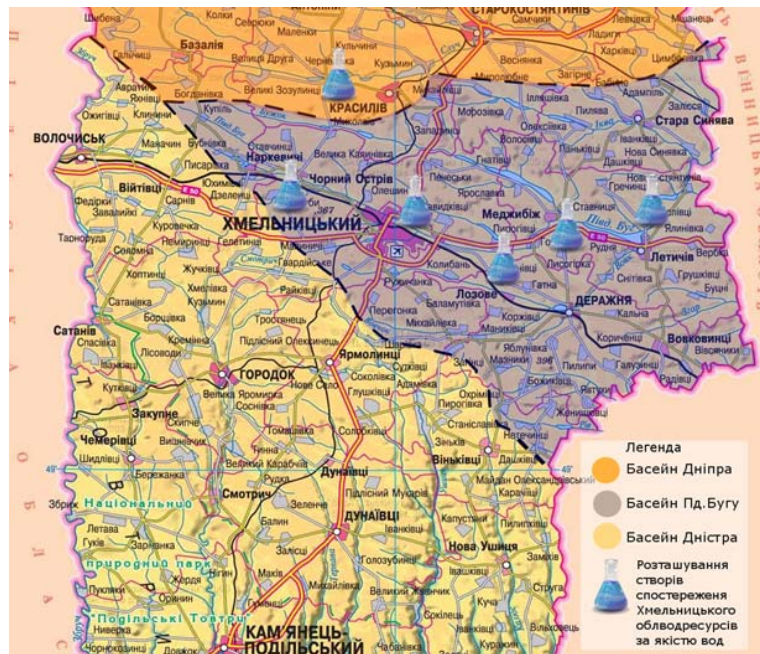


Рис. 1. Фрагмент річкової мережі Хмельницької області (басейн Південного Бугу) [6]

Таблиця 1

Результати розрахунків інтегральних індексів для оцінки якості вод р. Південний Буг за 2017 рік

Блок	Показник	Мар'янівське водосховище, смт Чорний Острів		Хмельницьке водосховище, вище м. Хмельницький		с. Копистин, нижче м. Хмельницький		Меджибізьке водосховище, смт Меджибіж		Щедрівське водосховище, смт Летичів	
		клас за показ.		клас за показ.		клас за показ.		клас за показ.		клас за показ.	
		сер.	найг.	сер.	найг.	сер.	найг.	сер.	найг.	сер.	найг.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	Завислі речовини	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4
	Запах	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Кольоровість	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2
	Блоковий індекс	1,67	2,0	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	2,33
II	Водневий показник	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
	Розчинений кисень	1	4	1	3	4	4	1	3	1	4
	ХСК	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	БСКп	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Окиснюваність перманганатна	3	3	2	3	3	4	2	2	3	3
	Лужність	3	4	3	3	4	4	4	4	3	3
	Сульфати	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
	Хлориди	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Магній	3	3	2	2	2	2	2	3	2	2
	Сухий залишок	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3
	Жорсткість загальна	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
	Азот амонійний	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
	Азот нітритний	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4
	Азот нітратний	3	4	3	4	3	4	4	4	3	3
	Фосфати	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4
	Блоковий індекс	2,87	3,27	2,53	3,0	3,2	3,33	3,0	3,27	2,87	3,13
VII	Залізо	3	3	1	2	3	3	3	3	1	2
	Мідь	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Марганець	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	СПАР	1	1	1	1	2	3	2	2	2	2
	Блоковий індекс	2,5	2,5	2,0	2,25	2,75	3,0	2,75	2,75	2,25	2,5
I_{Інт-сер}	2,35 клас 2, підклас 2(3)	2,07 клас 2, підклас 2	2,54 клас 3, підклас 2-3	2,47 клас 2, підклас 2(3)	2,26 клас 2, підклас 2(3)						
I_{Інт-нг}	2,59 клас 3, підклас 2-3	2,31 клас 2, підклас 2(3)	2,67 клас 3, підклас 2-3	2,56 клас 3, підклас 2-3	2,65 клас 3, підклас 2-3						

Таблиця 2

Узагальнені дані оцінки якості вод по створах спостережень на р. Південний Буг в межах Хмельницької області за період 2013–2017 рр.

Створи спостережень	Класи та підкласи якості води по роках спостережень					
	сер. (за середніми показниками)	2013 р.	2014 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.
1	2	3	4	5	6	
Мар'янівське водосховище, смт Чорний острів	сер.	клас 2, підклас 2(1)	клас 2, підклас 2(1)	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)
	найг.	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2	клас 3, підклас 2-3	клас 3, підклас 2-3	клас 3, підклас 2-3
Хмельницьке водосховище, вище м. Хмельницький	сер.	клас 2, підклас 2(1)	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2(1)	клас 2, підклас 2
	найг.	клас 2, підклас 2(1)	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2(3)

Продовження табл. 2

1		2	3	4	5	6
с. Копистин, нижче м. Хмельницький	сер.	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)	клас 3, підклас 2-3
	найг.	клас 3, підклас 2-3	клас 3, підклас 3(2)	клас 2, підклас 2(3)	клас 3, підклас 3(2)	клас 3, підклас 2-3
Меджибізьське водосховище, смт Меджибіж	сер.	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)
	найг.	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)	клас 3, підклас 2-3	клас 3, підклас 2-3
Щедрівське водосховище, смт Летичів	сер.	клас 2, підклас 2(1)	клас 2, підклас 2(1)	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2(3)
	найг.	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2	клас 2, підклас 2(3)	клас 2, підклас 2(3)	клас 3, підклас 2-3

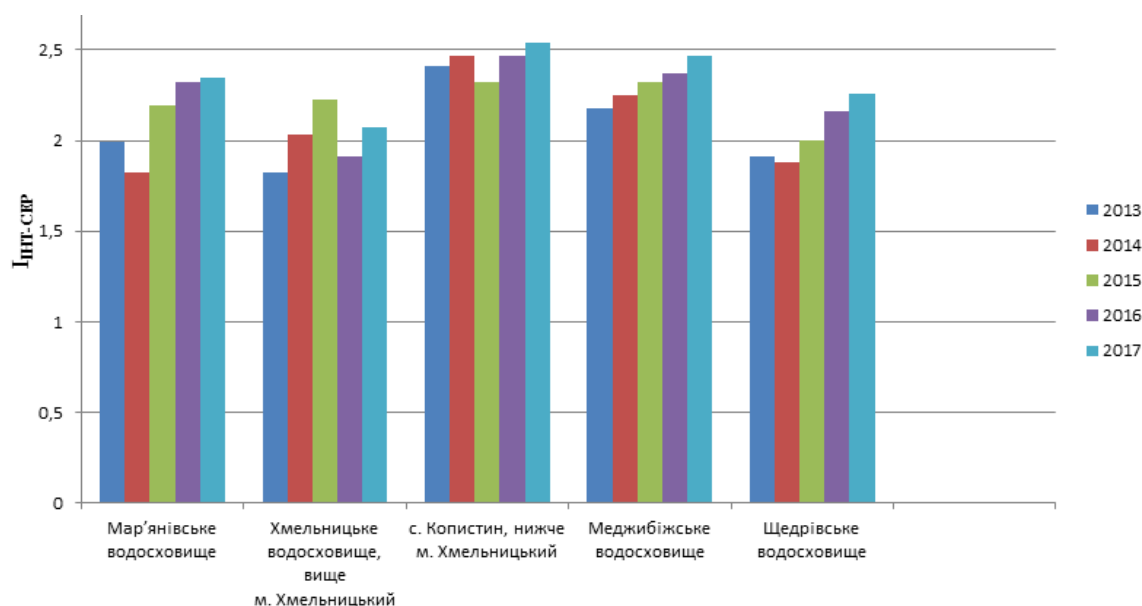


Рис. 2. Динаміка змін середніх інтегральних показників по створах спостережень

За найгіршими блоковими й інтегральним індексами якості вод – задовільна, слабо забруднена. Динаміку змін найгірших інтегральних індексів якості води в р. Південний Буг за період з 2013 року по 2017 рік по створах спостережень наведено на рис. 3.

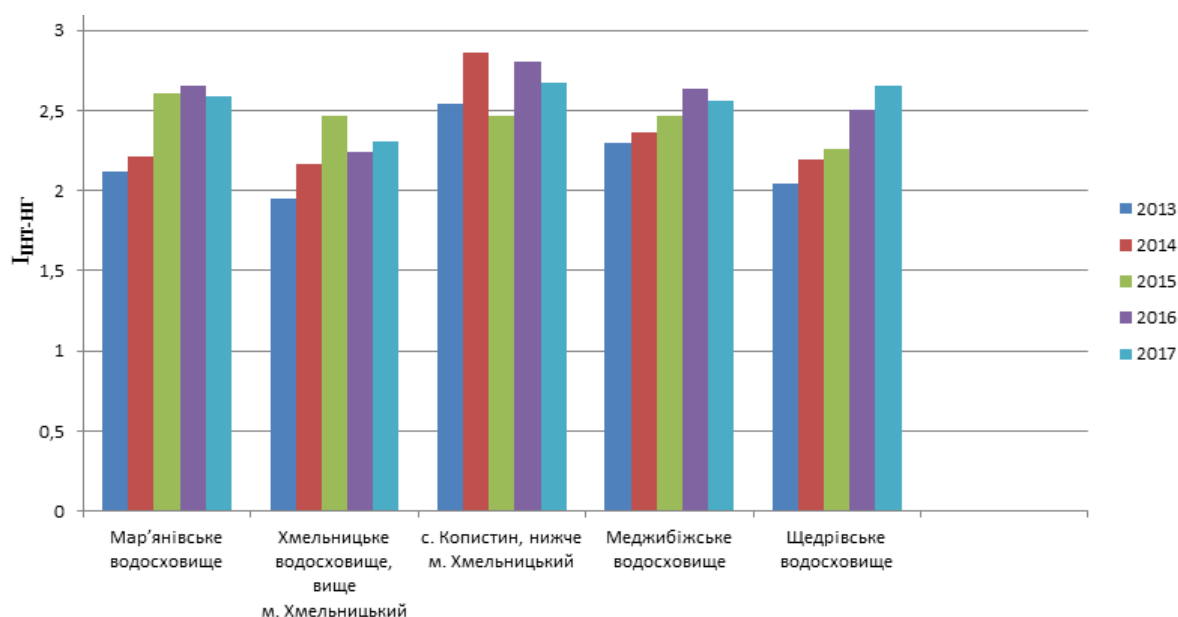


Рис. 3. Динаміка змін найгірших інтегральних показників по створах спостережень

Серед усього досліджуваного періоду найгірші показники характерні для 2017 року. Класи якості води (за середніми показниками / за найгіршими показниками) по створах спостережень р. Південний Буг в межах Хмельницької області за 2017 р. наведено на рис. 4.

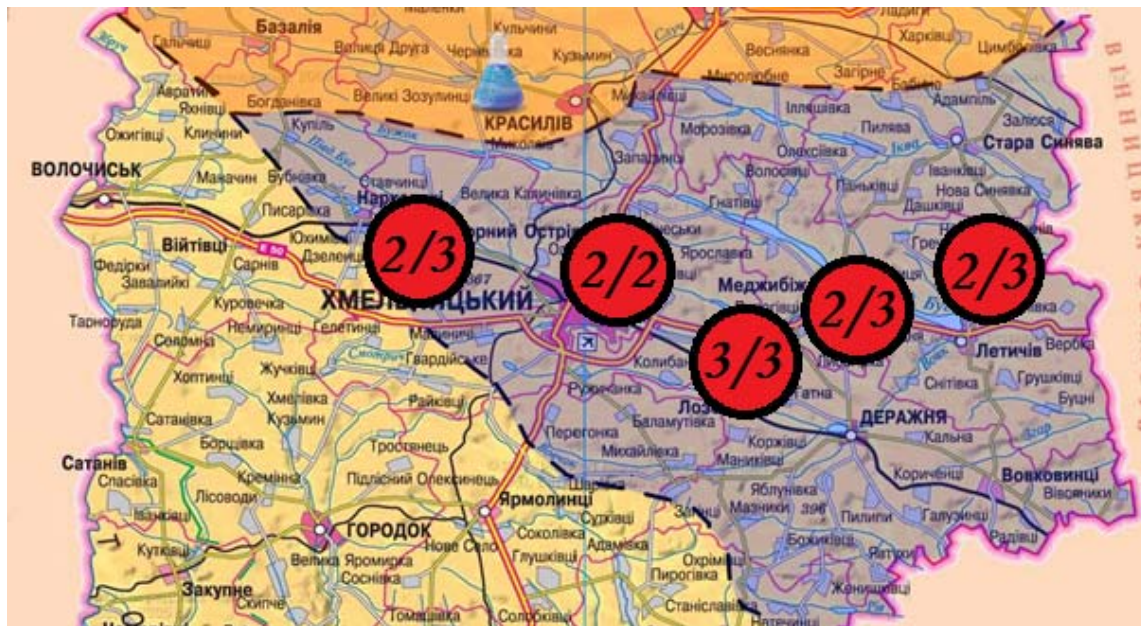


Рис. 4. Зміна якості води басейну р. Південний Буг в межах Хмельницької області

Найбільш суттєвий вплив на формування якості поверхневих вод р. Південний Буг в межах Хмельницької області чинять речовини токсичного (мідь) та трофо-сапробіологічного (амоній сольовий, нітрити, нітрати, фосфати, БСКповн.) блоків. Особливо гостро вплив забруднювачів проявляється на ділянках водотоки, які зазнають впливу стічних вод, оскільки основним джерелом забруднення вод сполуками азоту та фосфору є стічні води міст та населених пунктів, які є сумішшю промислових та господарсько-побутових стічних вод. Зростання концентрацій зазначених речовин призводить до евтрофікації природних вод, яка проявляється у збільшенні біомаси фітопланктону, масовому розвитку водоростей та «цвітінні» води, що погіршує екологічний стан та якість природних вод.

В цілому у динаміці змін якості води спостерігається чітка тенденція погіршення її якості за останні роки – значення інтегральних індексів зростають по всіх створах спостережень. Найгірші показники блокових та інтегральних індексів характерні для створу в с. Копистин, який знаходиться приблизно на 1 км нижче місця скиду стічних вод міського комунального підприємства «Хмельницькводоканал» (за середніми показниками – 2,54, за найгіршими показниками – 2,86). Покращення якості поверхневих вод басейну можна досягти за рахунок підвищення ефективності роботи діючих очисних споруд на основних підприємствах-водокористувачах та побудови і введення в експлуатацію нових ефективних очисних споруд.

У зв'язку з майже постійною маловодністю р. Південний Буг та високими температурами повітря на протязі значного часу впродовж року, в останні роки продовжується погіршення якості поверхневих вод і в створах Меджибізьського (сmt Меджибіж) та Щедрівського (с. Щедрова) водосховищ. При цьому збільшується забрудненість поверхневих вод органічними сполуками, вода стає більш жорсткою, концентрованою: збільшується вміст сухого залишку, мікроелементів кальцію, сульфатів, хлоридів, магнію у воді. Природні явища та забруднення поверхневих вод скидами зворотних вод підприємств сприяють погіршенню якості води річки.

Для покращення стану річки необхідно вживати водоохоронних заходів, першочерговими з яких повинні бути:

- капітальна реконструкція очисних споруд «Хмельницькводоканалу»;
- забезпечення суворого контролю за ступенем очистки стічних вод підприємств;
- здійснення будівництва зливової каналізації в населених пунктах для подачі зливових стоків на очисні споруди;
- покращення моніторингу якості води, а саме: створення механізму оперативного обміну систематизованими та узагальненими даними про стан поверхневих вод між установами, які безпосередньо здійснюють моніторинг та управління водними ресурсами в басейні Південного Бугу;
- дотримання режиму водоохоронних зон і прибережних захисних смуг для всіх річок і водойм.

Висновки

Якість води в басейні р. Південний Буг залежить від впливу господарської діяльності на водозборі. Основними чинниками, які впливають на кількісні та якісні показники стану поверхневих вод басейну Південного Бугу є забори води, скиди стічних вод різної категорії якості та безповоротні втрати води. В

результаті проведеного аналізу, можна засвідчити, що екологічний стан р. Південний Буг не відповідає нормам за окремими показниками та погіршується з кожним роком (в середньому показники погіршилися на 2 підкласи, наприклад: по Щедрівському водосховищу середній інтегральний показник змінився від 1,91 («добра», чиста вода з ухилом до класу «відмінної») у 2013 р. до 2,26 («добра», чиста вода з ухилом до класу «задовільної», слабо забрудненої прийнятної якості) у 2017 р. Найбільш суттєвий вплив на формування якості поверхневих вод р. Південний Буг в межах Хмельницької області чинять речовини токсичного (мідь) та трофо-сапробіологічного (амоній сольовий, нітрити, нітрати, фосфати, БСКповн.) блоків. Особливо гостро вплив забруднювачів проявляється на ділянках водотоку, які зазнають впливу стічних вод (ствір в с. Копистин, який знаходиться приблизно на 1 км нижче місця скиду стічних вод міського комунального підприємства «Хмельницькводоканал»).

Все це зменшує можливість використання води з р. Південний Буг на різноманітні потреби або потребує великих витрат для її підготовки з метою подальшого водокористування. Для покращення екологічного стану річки необхідно здійснювати технологічні й організаційні заходи щодо поліпшення санітарного й екологічного стану річки і її водозбірного басейну.

Література

1. Методика розрахунку коефіцієнта забрудненості природних вод: КНД 211.1.1.106-2003 Організація та здійснення спостережень за забрудненням поверхневих вод (в системі Мінекоресурсів) : затв. наказом Міністра екології та природних ресурсів України № 89-М від 4 червня 2003 р. – Київ, 2003. – С. 25–30.
2. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / [В.Д. Романенко, В.М. Жукинський, О.П. Оксіюк, А.В. Яцик та інші]. – К. : СИМВОЛ-Т, 1998. – 28 с.
3. Крайнюков О. Комплексна оцінка якості води та екостану водних об'єктів на території басейну річки Сіверський Донець у межах Харківської області [Електронний ресурс] / О. Крайнюков, І. Кривицька // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційна система освіти, науки і виробництва в сучасному інформаційному просторі», 31.05.2018 р. – Режим доступу : <http://econf.at.ua/>. – (дата звернення 18 липня 2018 р.).
4. ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 36 с.
5. Гопчак І.В. Екологічна оцінка стану поверхневих вод Волинської області та нормування їх якості : дис. ... канд. геогр. Наук : 11.00.07 / І.В. Гопчак / Національний ун-т водного господарства та природокористування. – Рівне, 2007. – 378 с.
6. Водні ресурси області [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Хмельницького управління водних ресурсів. – Режим доступу : <http://vodgosp.km.ua/> (дата звернення 16 липня 2018 р.).

References

1. Metodyka rozrakhunku koefitsiienta zabrudnenosti pryrodnykh vod: KND 211.1.1.106-2003 Orhanizatsiia ta zdiisnennia sposterezhen za zabrudnenniam poverkhnevyykh vod (v systemi Minekoresursiv) : zatv. nakazom Ministra ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy № 89-M vid 4 chervnia 2003 r. – Kyiv, 2003. – S. 25–30.
2. Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevyykh vod za vidpovidnyimi katehoriiami / [V.D. Romanenko, V.M. Zhukynskiy, O.P. Oksiiuk, A.V. Yatsyk ta inshi]. – K. : SYMVOL-T, 1998. – 28 s.
3. Krainiukov O. Kompleksna otsinka yakosti vody ta ekostanu vodnykh obiektiv na terytorii baseinu richky Siverskyi Donets u mezhakh Kharkivskoi oblasti [Elektronnyi resurs] / O. Krainiukov, I. Kryvytska // Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Intehratsiina systema osvity, nauky i vyrobnytstva v suchasnomu informatsiinomu prostori», 31.05.2018 r. – Rezhym dostupu : <http://econf.at.ua/>. – (data zvernennia 18 lypnia 2018 r.).
4. DSTU 4808:2007. Dzherela tsentralizovanoho pytnoho vodopostachannia. Hihienichni ta ekolohichni vymohy shchodo yakosti vody i pravyla vybyrannia. – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2007. – 36 s.
5. Hopchak I.V. Ekolohichna otsinka stanu poverkhnevyykh vod Volynskoi oblasti ta normuvannia yikh yakosti : dys. ... kand. heohr. Nauk : 11.00.07 / I.V. Hopchak / Natsionalnyi un-t vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – Rivne, 2007. – 378 s.
6. Vodni resursy oblasti [Elektronnyi resurs] // Ofitsiyni sait Khmelnytskoho upravlinnia vodnykh resursiv. – Rezhym dostupu : <http://vodgosp.km.ua/> (data zvernennia 16 lypnia 2018 r.).

Рецензія/Peer review : 16.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.пед.н., доц. Білецька Г.А.

УДК 621.3.089

М.П. СВИТА
ТОВ "НВФ "ПРОБА", м. Київ
Н.М. ЗАЩЕПКИНА

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**ВИКОРИСТАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ДЛЯ
ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ
ГАЗІВ ПНЕВМОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ**

Розглянуто принцип вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів за допомогою диференційних перетворювачів тиску і усереднювальних напірних трубок. Наведені переваги використання усереднювальних напірних трубок. Проведено порівняння двох серій мостових тензорезистивних датчиків тиску від компанії «Honeywell», які можуть бути використані під час розробки витратомірів газів, основаних на пневмометричному методі. Показані позитивні та негативні характеристики датчиків. Запропоновано використовувати автоматичний метод установки нуля диференційних датчиків при вимірюванні швидкості та об'ємної витрати газів в ході неперервного технологічного процесу.

Ключові слова: диференційний датчик, тиск, швидкість, об'ємна витрата, напірна трубка, пневмометричний метод, усереднювальна трубка.

M.P. SVYTA
LLC "RPC "PROBA"
N.M. ZASHCHEPKINA

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"

**USE OF DIFFERENTIAL PRESSURE SENSORS FOR MEASURING SPEED
AND VOLUME FLOW OF GASES BY PNEUMOMETRIC METHOD**

The purpose of the work is to consider the principle of measuring the velocity and volume flow of gases by means of differential pressure transducers and averaging pressure tubes. Advantage in the use of averaging pressure tubes. Conduct a comparison of two series of bridge pressure sensors from Honeywell, which can be used in the development of speed and volume flow meters based on the pneumometric method. Show positive and negative sensor characteristics. Suggest to use an automatic method for setting the zero voltage of differential sensors when measuring the velocity and volume of gases during a continuous process. The principle of measuring the velocity and volume flow of gases by means of differential pressure transducers and averaging pressure tubes is considered. The advantages of using averaging pressure tubes are given. Positive and negative characteristics of differential pressure sensors are shown. The paper considers the pneumometric method of measuring the velocity and volume flow of gases. The advantages of the use of averaging pressure tubes and miniature differential pressure sensors from Honeywell, the 24PC and CPC series are given. The principle of operation of pressure sensors is described. His electric circuit is shown, their characteristics are presented. Schematically shows software and hardware solutions for compensation of voltage bias zero and hysteresis of differential pressure sensors, control system of the device. The practical scheme of thermocompensation of sensors using a precision thermistor is shown. It is proposed to eliminate the hysteresis and the voltage zero displacement of differential pressure sensors by periodically connecting static pressure to both sensor connectors using an electromagnetic valve. This way you can significantly improve the accuracy of the measurement.

Key words: differential sensor, pressure, velocity, volume flow, pressure tube, pneumometric method, averaging tube.

Вступ

Сучасні диференційні датчики тиску (далі – ДДТ) знайшли широке коло застосувань в ході вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів, завдяки простоті їх використання і високій точності вимірювань. Масове виробництво ДДТ компаніями Honeywell, Freescale, Sensirion, Omron та ін., основаних на тензорезистивному або п'єзорезистивному ефекті та ін., призвели до появи великої кількості приладів для вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів. Ці прилади використовують в своїй роботі метод змінного перепаду тиску, який утворюється безпосередньо в напірній (пневмометричній) трубці або на звужуючому пристрої (діафрагмі). Цей перепад тиску на фоні великого статичного тиску відчувають ДДТ. Змінний перепад тиску або динамічний тиск в напірній трубці утворюється як різниця між повним і статичним тиском [1]. Змінний перепад тиску на звужуючому пристрої утворюється як різниця між статичним тиском перед звужуючим пристроєм і після нього [2].

Використання напірних трубок при вимірюванні більш доцільне, так як вони утворюють значно менший опір в трубопроводі газовому потоку ніж звужуючі пристрої, що дозволяє зменшити витрати тиску при транспортуванні газу. Конструкцій напірних трубок дуже багато. Серед найрозповсюджених є конструкції Міот, Піто, Гінцветмет, НИИОГАЗ [1, 3]. Ці трубки використовують для точкового вимірювання швидкості газового потоку в газозоді [7]. Можливе також використання усереднювальних напірних трубок, які дозволяють отримати середнє значення динамічного тиску по всьому поперечному перерізу газозоду. Це дозволяє вимірювати середню швидкість і об'ємну витрату газу. Напірні трубки в порівнянні зі звужуючими пристроями мають багато переваг. Серед них простота виготовлення, обслуговування і монтажу на об'єктах, можливість виготовлення трубки для будь-яких діаметрів газозоду. Головне обмеження при використанні пневмометричного методу, швидкість газового потоку повинна бути

більшою за 2 м/с. Принцип вимірювання швидкості та об'ємної витрати пневмометричним методом за допомогою ДДТ і усереднювальної напірної трубки представлено на рис. 1.

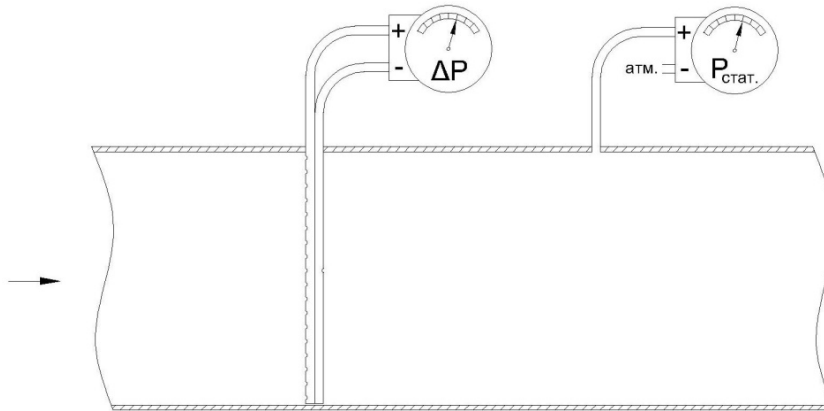


Рис. 1. Вимірювання перепаду тиску в усереднювальній напірній трубці і вимірювання статичного тиску за допомогою ДДТ

Формула для вимірювання швидкості газового потоку пневмометричним методом, V [м/с], має вигляд [1]:

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta P \cdot K}{0,3593 \cdot \rho \cdot \left(\frac{Pa + Pc}{273,15 + T}\right)}} \quad (1)$$

де ΔP – динамічний тиск, який створюється газовим потоком в напірній трубці, [мм вод. ст.];
 K – коефіцієнт напірної трубки, безрозмірна величина;
 $g = 9,81$ [м/с²];
 Pa – атмосферний тиск, [мм рт. ст.];
 ρ – щільність газу за нормальних умов ($P=760$ мм рт. ст., $t=0$ °С), [кг/м³], наприклад для повітря $\rho=1,293$ кг/м³;

Pc – статичний тиск газового потоку, [мм рт. ст.];
 T – температура газового потоку, [°С].

Формула для розрахунку об'ємної витрати Q , [м³/год], має вигляд [1]:

$$Q = Vc \cdot S \cdot 3600 \quad (2)$$

де Vc – середня швидкість в перерізі газоходу, [м/с];
 S – площа поперечного перерізу газоходу, [м²].

З формули (1) видно що для розрахунку швидкості треба вимірювати: динамічний тиск, статичний тиск, атмосферний тиск і температуру газу. Також, треба знати коефіцієнт напірної трубки, який визначається при метрологічній атестації і щільність газу за нормальних умов. Для вимірювання динамічного тиску та статичного тиску використовують ДДТ.

Постановка проблеми

Серійно виготовляється дуже багато різних ДДТ, вони відрізняються діапазонами вимірювання, чутливістю, точністю, умовами використання. Конструктивно, ДДТ випускаються у різних виконаннях, вони мають різні габарити, масу, вихідні інтерфейси. Можливість роботи при високих статичних тисках, наявність термокомпенсації і способів установки нуля диференційного тиску, роблять такі датчики закінченими вузлами вимірювачів швидкості та об'ємної витрати газів. Моделі які містять всі ці переваги в одному конструктиві (корпусі) мають великі розміри, масу, споживання струму, дорого коштують і як правило використовуються у складі розгалужених АСУТП систем, і не використовуються у портативному приладобудуванні. На рис. 2 показані різні моделі ДДТ.

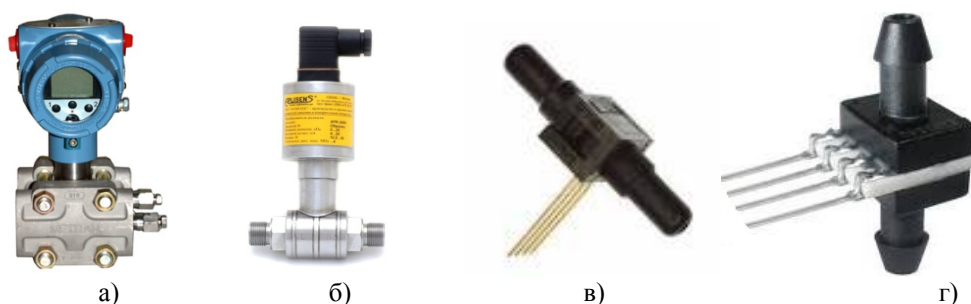


Рис. 2. ДДТ різних виробників: а) Метран 150CDR, б) Aplisens APR2000, в) Honeywell 24PC, г) Honeywell CPC

Більш цікавими для розробників є мініатюрні ДДТ, які дозволяють створити прилади з конкурентною ціною, меншими габаритами, а весь допоміжний функціонал виконати завдяки програмно-апаратним рішенням. Дуже цікаві з даної точки зору є ДДТ, від компанії Honeywell зображені на рис. 2 в, г [5, 6]. Чутливий п'єзорезистивний елемент таких ДДТ, являє собою чотири резистора, розташованих на поверхні кремнієвої діафрагми, включених по мостовій схемі Уїтстона. Тиск, який прикладається до діафрагми, призводить до зміни опору резисторів, яке перетворюється в електричний сигнал. Вихідна напруга при цьому пропорційна напрузі живлення і прикладеного до діафрагми тиску. На рис. 3 зображена електрична принципова схема живлення мостових ДДТ від джерела постійного струму.

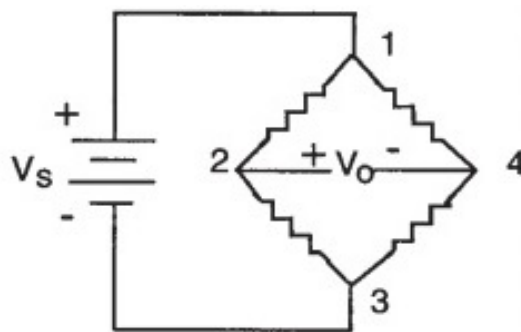


Рис. 3. Електрична принципова схема живлення ДДТ. V_s – джерело живлення, V_o – вихідна напруга ДДТ, 1–4 – виводи ДДТ

Метою статті є порівняння ДДТ серій 24РС і СРС від компанії «Honeywell» які доречно застосовувати при розробці вимірювачів швидкості та витратомірів газів. Запропонувати автоматичний програмно-апаратний метод установки нуля ДДТ для компенсації температурного дрейфу напруги зміщення нуля та гістерезису.

Результати роботи

Основні технічні характеристики ДДТ для вимірювання динамічного тиску, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ДДТ для вимірювання ΔP , від Honeywell

Назва моделі	Максимальний робочий тиск, [кПа]	Максимальний допустимий статичний тиск, [кПа]	Напруга живлення, [В]	Максимальна вихідна напруга при максимальному робочому тиску і номінальному живленні, [мВ]	Чутливість, при номінальному живленні, [мВ/кПа]
24PCE	$\pm 3,5$	103	2,5 - 12	± 35	± 10
CPCL04	± 1	340	3 - 16	± 25	± 25

Основні технічні характеристики ДДТ для вимірювання статичного тиску, наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики ДДТ для вимірювання статичного тиску, від Honeywell

Назва моделі	Максимальний робочий тиск, [кПа]	Максимальний допустимий статичний тиск, [кПа]	Напруга живлення, [В]	Максимальна вихідна напруга при максимальному робочому тиску і номінальному живленні, [мВ]	Чутливість, при номінальному живленні, [мВ/кПа]
24PCC	± 103	310	2,5 - 12	± 225	$\pm 2,2$
CPCL60	$\pm 413,7$	1241	3 - 16	± 90	$\pm 0,22$

Представленні ДДТ мають багато переваг, а саме:

- Широкий діапазон напруг живлення ДДТ
- Лінійність - $\pm 0,25\%$
- Гістерезис - $\pm 0,15\%$
- Час відклику - 1 мс
- Нестабільність характеристики - 0,5%/рік
- Діапазон робочих температур - від -40 до + 85 °С
- Серія СРС має термокомпенсацію, серія 24РС не має.

Недоліками даних ДДТ є:

- Гістерезис, хоч він і не значний, але при вимірюванні малих перепадів тиску (малих швидкостей газового потоку), він може внести велику похибку. Так, при швидкості 2 м/с в напірній трубці при нормальних умовах, утворюється тиск $\sim 2,5$ Па.

- Напруга зміщення нуля ДДТ, при зміні температури - ± 1 мВ, це значна величина, яка потребує програмно-апаратних рішень по установці нуля ДДТ.

- В серії 24РС відсутня термокомпенсація, це також треба враховувати для усунення похибки, спричиненої змінами температури.

В ході безперервного технологічного процесу на точність вимірювання буде суттєво впливати зміна

температури навколо ДДТ. При зміні температури буде виникати дрейф напруги зміщення нуля ДДТ. Це приведе до похибки вимірювання динамічного тиску в усереднювальній напірній трубці, а також швидкості потоку та об'ємної витрати. В таких випадках треба виконати термостатування ДДТ від джерел тепла в корпусі та з зовні приладу. За допомогою системи керування (мікроконтролера), потрібно відслідковувати зміну температури в корпусі приладу або періодично корегувати нуль ДДТ, для досягнення максимальної точності вимірювання [10].

Запропоновано, гістерезис і напругу зміщення нуля ДДТ усувати методом періодичного підключення статичного тиску до обох штуцерів ДДТ за допомогою електромагнітного клапану, це показано на рис. 4. А також використовувати програмно-апаратні рішення для компенсації напруги зміщення нуля ДДТ та гістерезису системою керування приладу, наведені нижче.

Прилад повинен працювати у двох режимах, режимі вимірювання і режимі встановлення нуля ДДТ. В режимі вимірювання клапан закритий і змінний перепад тиску потрапляє на ДДТ. В режимі встановлення нуля ДДТ, електромагнітний клапан відкривається, таким чином статичний тиск потрапляє на обидва штуцери ДДТ, після чого схема керування повинна запам'ятати або зкомпенсувати напругу зміщення.

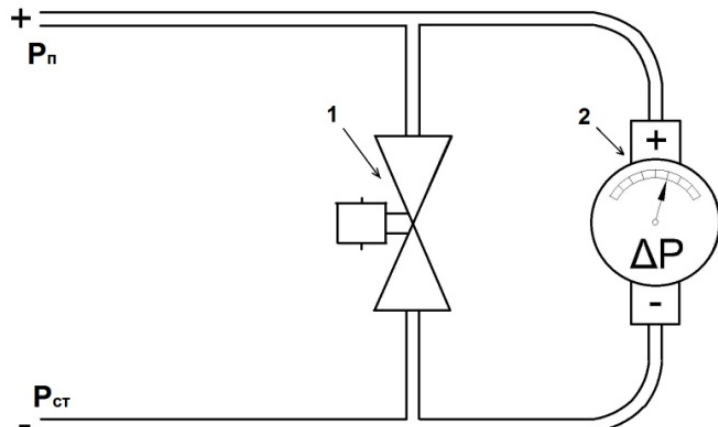


Рис. 4. Обнулення тиску ДДТ за допомогою електромагнітного клапану: 1 – Електромагнітний клапан, 2 – ДДТ вимірювання динамічного тиску, P_n – повний тиск усереднювальної напірної трубки, $P_{ст}$ – статичний тиск усереднювальної напірної трубки

Типова структурна схема вимірювання тиску зображена на рис. 5.

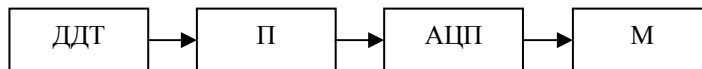


Рис. 5. Структурна схема каналу вимірювання тиску, на основі ДДТ: ДДТ – диференційний датчик тиску, П – підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, М – мікроконтролер

Компенсування напруги зміщення ДДТ, можна організувати наступними методами:

1. В режимі компенсації напруги зміщення ДДТ, мікроконтролер запам'ятовує код значення АЦП і приймає його за нуль. В режимі вимірювання потрібно із поточного коду виміру відняти запам'ятоване значення нуля. Головне обмеження даного методу це передбачення значень напруг зміщення нуля (коду АЦП), щоб не потрапити в насичення по коду АЦП.

2. В режимі компенсації напруги зміщення ДДТ, мікроконтролер виробляє модулем цифро-аналогового перетворювача або модулем широтно-імпульсної модуляції сигнал, яким прагне збалансувати вимірювальний міст ДДТ, таким чином встановити код АЦП в нуль. Цей спосіб зображено на рис. 6.

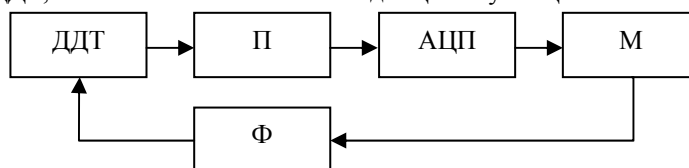


Рис. 6. Балансування мосту ДДТ за допомогою сигналу з мікроконтролера: ДДТ – диференційний датчик тиску, П – підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, М – мікроконтролер, Ф – фільтр

3. В режимі компенсації напруги зміщення ДДТ, мікроконтролер виробляє цифрові сигнали управління мікросхемою цифрового потенціометра, завдяки яким прагне збалансувати вимірювальний міст ДДТ, таким чином встановити код АЦП в нуль. Цей спосіб зображено на рис. 7.

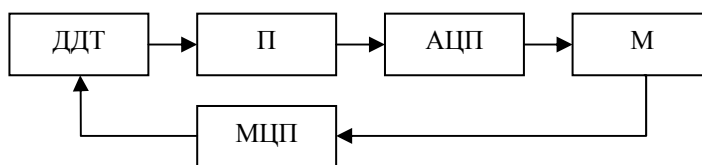


Рис. 7. Балансування мосту ДДТ за допомогою мікросхеми цифрового потенціометра: ДДТ – диференційний датчик тиску, П – підсилювач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, М – мікроконтролер, МЦП – мікросхема цифрового потенціометра

Похибка пов'язана з чутливістю характеристики ДДТ до змін температури вирішується включенням послідовно з датчиком терморезистора, що має негативний температурний коефіцієнт [4]. Практична схема такої термокомпенсації з використанням прецизійного терморезистора типу 2M1501 фірми «Dale Electronics,

Інс» представлена на рис. 8.

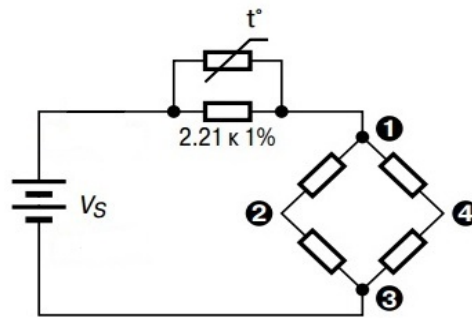


Рис. 8. Термокомпенсація ДДТ за допомогою терморезистора: V_S – джерело живлення, 1–4 – виводи ДДТ

Висновки

В роботі показані переваги використання усереднювальних напірних трубок для вимірювання швидкості та об'ємної витрати газів. Порівняно ДДТ серій 24PC та CPC від компанії «Honeywell», розглянуті їх переваги і недоліки. Запропоновано використовувати автоматичний метод для установки нуля ДДТ на основі електромагнітного клапану. Показані програмно-апаратні рішення які можуть бути використані при розробці вимірювачів швидкості та витратомірів газів.

Література

- ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. Межгосударственный стандарт. – [Дата введения с 01.01.1991 г.].
- ДСТУ 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003). Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. – [Чинний з 01.04.2010 р.]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 98 с. – (Національний стандарт України).
- ГОСТ 12.3.018-79. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. Межгосударственный стандарт. – [Дата введения с 01.01.1981 г.].
- Рабодзей А.Н. Библиотека электронных компонентов. Выпуск 15: Датчики фирмы «Honeywell» / А.Н. Рабодзей. – М. : ДМК Пресс, 2016.
- Operating manual. Honeywell sensing and control. CPC/CPCL series.
- Operating manual. Honeywell sensing and control. 24PC series.
- ГОСТ 8.361-79. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Расход жидкости и газа. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы. Государственный стандарт союза ССР. – [Дата введения с 01.07.1980 г.].
- Кулебякин В.В. Методы и приборы для измерения расхода жидкостей и газов : учебно-методическое пособие / Кулебякин В.В. – Минск : БНТУ, 2017.
- Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока / Петунин А.Н. – М. : «Машиностроение», 1972. – 332 с.
- Шонфелдер Г. Измерительные устройства на базе микропроцессора ATmega / Шонфелдер Герт, Шнайдер Корнелиус ; пер. с нем. – СПб : БХВ-Петербург, 2014. – 249 с.

References

- Nature protection. Atmosphere. Methods for determination of velocity and flowrate of gas-and-dust streams from stationary sources of pollution. GOST 17.2.4.06-90 - [Date of introduction from 01.01.1991], Interstate standard.
- Measurement of flow rate and quantity of liquid and gas with the use of standard narrowing devices. Part 1. DSTU 8.586.1-2005 (ISO 5167-1: 2003) - [effective as of 01.04.2010] -K. : Derzhspozhyvstandard Ukraine 2010, 98 p., National Standard of Ukraine.
- Ventilation systems. Methods of aerodynamic tests. GOST 12.3.018-79- [Date of introduction from 01.01.1981], Interstate standard.
- Library of electronic components. Issue 15: Sensors from Honeywell Inc. Workers - M.: DMC Press. 2016
- Operating manual. Honeywell sensing and control. CPC/CPCL series.
- Operating manual. Honeywell sensing and control. 24PC series.
- State system for ensuring uniformity of measurements (GSI). Fluid and gas flow rate. Method of performing measurements on the speed at one point of the pipe section. GOST 8.361-79 - [Date of introduction from 01.07.1980], State standard of the Union of Soviet Socialist Republics.
- Kulebyakin V. Methods and instruments for measuring the flow of liquids and gases - Methodological manual, Minsk BNTU 2017.
- Petunin AN Methods and techniques for measuring the parameters of the gas flow - M., "Mechanical Engineering", 1972. - 332 p.
- Schonfelder G. Measuring devices based on microprocessor ATmega: Per. with Germany / Schonfelder Gert, Schneider Cornelius - SPB. : BHV-Petersburg, 2014. - 249 p.

Рецензія/Peer review : 17.8.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.Г. Здоренко

ЙМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЗОН ВАРІАБЕЛЬНОСТІ АГРОБІОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАЛЕЖНОЇ ЯКОСТІ ВИКОНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ У РОСЛИННИЦТВІ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЛОКАЛЬНОГО ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ

Методика виділення зон варіабельності агробіологічного стану сільськогосподарських угідь як основа ефективного використання технологій точного землеробства призначена для використання у галузі сільськогосподарського господарства і може бути використана в сучасних технологіях сільськогосподарського виробництва, технологіях точного землеробства, безпосередньо у рослинництві, загальному землеробстві і призначена для підвищення достовірності визначення агрохімічного стану ґрунтового середовища при оперативному агрохімічному обстеженні ґрунтів шляхом моніторингу агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь, зокрема відбору проб ґрунту, оперативного визначення потенційної родючості ґрунтів для застосування технологій диференційованого локально-дозованого внесення технологічного матеріалу (добрив, насіння тощо), а також може бути застосована при виконанні агрохімічного обстеження ґрунтів власниками земель та землекористувачами. Сьогодні при впровадженні сучасних технологій сільськогосподарського виробництва, зокрема диференційованого внесення технологічного матеріалу (насіння, добрив тощо) не вистачає інформації про зони та величину зон варіабельності агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь, володіння якими дозволяє отримати достовірну інформацію вірно скорегувавши точки відбору проб, виділити зони внесення технологічного матеріалу тощо. Так, наприклад, при відборі зразків ґрунтових проб. Як правило, на поле накладають сітку розмірами від 2 до 20 га, яка ув'язана з геометрією поля, контурами, рельєфом тощо. Проте вона не ув'язана з агробіологічними параметрами сільськогосподарських угідь та не має жодного відношення до величини їх варіабельності. Це накладає відбиток на достовірність отриманих даних, а відповідно і ефективність реалізації сучасних технологій землеробства, такий як диференційоване внесення технологічного матеріалу як в системі точного землеробства, так і окремо.

Ключові слова: точне землеробство, варіабельність, агробіологічний стан.

O.O. BROVARETS

Kyiv Cooperative Institute of Business and Law

PROBABILISTIC AND STATISTICAL METHODS DETERMINATION OF AGROBIOLOGICAL ZONES VARIABILITY PARAMETERS FARMLAND TO ENSURE PROPER QUALITY OF PERFORMANCE OF MANUFACTURING OPERATIONS IN PLANT BASED LOCAL OPERATIONAL MONITORING

The method of allocating zones of variability of the agrobiological state of agricultural lands - as the basis of the effective use of precision farming technologies, is intended for use in agriculture and can be used in modern agricultural technology technologies, precision agriculture technologies, directly in crop production, general agriculture and is intended to increase the reliability of the definition Agrochemical state of the soil environment under operational agrochemical soil survey by monitoring the agrobiological state of the soil environment of agricultural lands, in particular soil sampling, the operative determination of the potential fertility of soils for the application of technologies of differentiated locally-dosed introduction of technological material (fertilizers, seeds, etc.), and can also be applied when performing agrochemical soil surveys by land owners and land users. Today, when introducing modern technologies of agricultural production, in particular, the differentiated introduction of technological material (seeds, fertilizers, etc.), there is insufficient information about the zone and the magnitude of the zones of variability of agrobiological parameters of agricultural lands, the possession of which allows obtaining reliable information by correcting the sampling points, allocating the zone of introduction of technological material etc. So for example, when sampling ground samples. As a rule, a grid of 2 to 20 hectares is imposed on the field, which is connected with the geometry of the field, contours, relief, and the like. However, it is not related to the agrobiological parameters of agricultural land and has nothing to do with the magnitude of their variability. This imposes an imprint on the reliability of the data obtained, and, accordingly, the efficiency of the implementation of modern agricultural technologies, such as the differentiated introduction of technological material in the system of precision agriculture and separately.

Key words: precision agriculture, variability, agrobiological condition.

Постановка проблеми. Огляд сучасних літературних джерел та наукових розробок [1] показує, що останніми роками відбувається процес інтеграції натурального (органічного або біологічного), біодинамічного, екстенсивного, інтенсивного (промислового) та no-till землеробства з новітніми технологіями, зокрема з інформаційно-технічними системами оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь. При цьому останній напрям є найбільш актуальним та перспективним для умов України.

Один з головних підходів при застосуванні сучасних технологій землеробства – оптимізувати урожайність і забезпечити екологічну якість сільськогосподарської продукції із врахуванням варіабельності зон управління сільськогосподарським полем (рис. 1). Знання певної структура варіабельності ґрунтового покриву дозволяє прийняти ефективні рішення для управління агробіологічним потенціалом сільськогосподарських угідь [1–17].

Таким чином, схема сучасного управління агробіологічним потенціалом сільськогосподарського агропідприємства (рис. 1) передбачає наявності загальних елементів: склад технологічних матеріалів, виробництво та склад нафтопродуктів та сільськогосподарських підприємств та новітніх елементів для

ефективного функціонування сільськогосподарського виробництва шляхом підвищення якості виконання технологічних операцій.

Точне землеробство передбачає виконання [1, 2, 3, 7] кожної технологічної операції згідно відповідної картограми, яка розробляється попередньо на основі різнопланової інформації. Загальну схему реалізації точного землеробства наведено на рис. 1.



Рис. 1. Схема сучасного управління агробіологічним потенціалом агропідприємством

Закономірним за сучасних умов розвитку техніки та ринкових відносин, що характеризуються розвитком інформаційних технологій і неухильним зростанням цін на енергоносії, є використання нових технологій для моніторингу, застосування яких дає можливість одержувати значний економічний ефект завдяки оптимальному використанню виробничих засобів і технологічних процесів. Невід'ємною складовою сучасного сільського господарства є моніторинг агробіологічного та фітосанітарного стану сільськогосподарських угідь перед сівою, протягом вегетації та при збиранні врожаю (рис. 2).

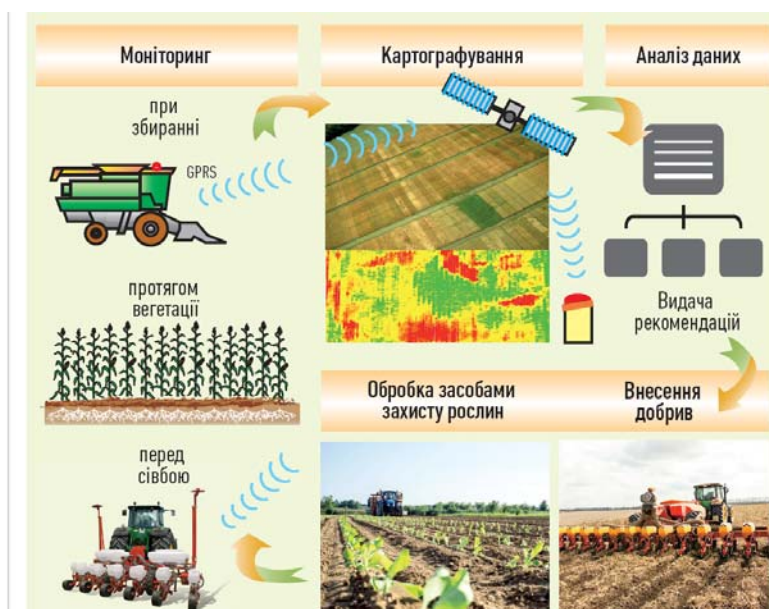


Рис. 2. Схема реалізації сучасних технологій землеробства

Аналіз публікацій по темі дослідження. Сьогодні при впровадженні сучасних технологій сільськогосподарського виробництва, зокрема диференційованого внесення технологічного матеріалу (насіння, добрив тощо) не вистачає інформації про зони та величину зон варіабельності агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь, володіння якими дозволяє отримати достовірну інформацію вірно скорегувавши точки відбору проб, виділити зони внесення технологічного матеріалу тощо.

Так наприклад, при відборі зразків ґрунтових проб. Як правило, на поле накладають сітку розмірами від 2 до 20 га, яка ув'язана з геометрією поля, контурами, рельєфом тощо. Проте вона не ув'язана з агробіологічними параметрами сільськогосподарських угідь та не має жодного відношення до величини їх варіабельності. Це накладає відбиток на достовірність отриманих даних, а відповідно і ефективність реалізації сучасних технологій землеробства, такий як диференційоване внесення технологічного матеріалу

як в системі точного землеробства так і окремо [1–17].

Мета досліджень є відображення ймовірно-статистичних методів визначення величини зон варіабельності агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь для забезпечення належної якості виконання технологічних операцій у рослинництві на основі даних локального оперативного моніторингу.

Виклад основного змісту дослідження. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці методики визначення величини зон варіабельності агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь для забезпечення належної якості виконання технологічних операцій у рослинництві. Це дає можливість підвищити достовірність отриманих даних, а відповідно і ефективність впровадження сучасних технологій сільськогосподарського виробництва.

Виділення таких зон можливо з врахування величини варіабельності цих показників по трьох рівнях:

1. Дані дистанційного моніторингу агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь на основі даних супутникового моніторингу або з використанням дронів X_1 .

2. Моніторингу урожайності, а відповідно і рельєфу поля X_2 .

3. Дані отриманні з використанням пристрою моніторингу електропровідних характеристик ґрунтового середовища X_3 .

Кожен із цих даних може бути використаний окремо X_1 , X_2 , X_3 або у комплексі із коефіцієнтами вагомості впливу на кінцевий коефіцієнт зон варіабельності X_3 :

$$X_3 = K_1 \cdot X_1 + K_2 \cdot X_2 + K_3 \cdot X_3 \quad X_3 = k_1 \cdot X_1 + k_2 \cdot X_2 + k_3 \cdot X_3, \quad (1)$$

де K_1 , K_2 , K_3 – коефіцієнти вагомості кожного показника, при визначенні зон варіабельності.

Такі дані будуть актуальні при роботі із рівнями варіювання, які до речі не регламентовані нормативними документами та стандартами.

Для цього спочатку отримані дані довільно з рівними інтервалами потрібно розбити на рівних частин. Рекомендовано 5 рівнів.

Далі маємо візуально оцінити закон по якому закону такі дані можемо апроксимувати.

Як правило дані по трьох рівнях підлягають нормальному закону розподілу.

У цьому випадку їх доцільно розбити на 3 або 6 рівні, залежно величини σ^2 . У випадку $\sigma^2 > 1$ доцільно виділяти три зони варіабельності. У випадку $\sigma^2 < 1$ доцільно виділяти 6 зон варіабельності

Також ці дані залежать від математичного сподівання. У нашому випадку приймаємо $\mu = 0$.

При $\mu < 0$. Математичне сподівання встановлює пріоритет величини показників, залежно від яких може зміщуватися крива розподілу випадкових величини.

Математичне сподівання, середнє значення – одна з основних числових характеристик кожної випадкової величини. Воно є узагальненим поняттям середнього значення сукупності чисел на той випадок, коли елементи множини значень цієї сукупності мають різну "вагу", ціну, важливість, пріоритет, що є характерним для значень випадкової змінної [1].

Контроль якості виконання технологічних операцій у рослинництві базується на виконанні вимірювань. Наприклад, для оцінки якості виконання оранки необхідно зробити певну кількість вимірів глибини обробітку ґрунту, для оцінки якості виконання сівби-півну кількість вимірів глибини загортання насіння у ґрунт і величини відхилення рослин від осової лінії рядка тощо. В усіх цих випадках в результаті виконання вимірювань одержують масиви (тобто велику кількість) значень глибини обробітку ґрунту, глибини загортання насіння у ґрунт і величини відхилення рослин від осової лінії рядка.

Аналіз цих масивів показує, що їх окремі значення відрізняються одне від одного. Наприклад, можемо мати такий масив даних глибини обробітку ґрунту (см) у порядку виконання вимірювань: 25; 26,3; 24,5; 25; 27,2; 25,8; 27,2 і т.д. Результати вимірювань вказують на наявність відхилень фактичної глибини обробітку ґрунту від заданої (наприклад, 25 см), які, в свою чергу, можуть бути обумовлені рядом факторів, таких як нерівності поверхні ґрунту, різна щільність і вологість ґрунту по напрямку руху орного агрегату і т.д. Виконуючи вимірювання глибини обробітку ґрунту, кожного разу отримують її значення, наперед невідомо, яке саме. Тобто глибина обробітку ґрунту є випадковою величиною.

Переважає більшість процесів і явищ у сільськогосподарському виробництві мають своїми характеристиками саме випадкові величини. Наприклад: 1 – кількість стебел пшениці на 1 м² поля, 2 – вага коренеплоду цукрового буряка, 3 – глибина загортання насіння у ґрунт при сівбі, 4 – кількість відказів у роботі трактора протягом року.

Випадкові величини у прикладах 1 і 4 є дискретними, тобто такими, які набувають тільки відділених одне від одного значень. Випадкові величини у прикладах 2 і 3 є безперервними, тобто такими, можливі значення яких безперервно заповнюють деякий проміжок.

При дослідженні процесу чи явища, характеристикою якого є випадкова величина, важливо знати (або встановити) закон її розподілу. *Законом розподілу випадкової величини* називається всяке співвідношення, яке встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини A – a_1, a_2, \dots, a_n і відповідними їм ймовірностями p_1, p_2, \dots, p_n . Найпростішою формою представлення такого закону є таблиця:

a_i	a_1	a_2	...	a_n
p_i	p_1	p_2	...	p_n

Така таблиця називається рядом розподілу випадкової величини А.

Ряд розподілу існує тільки для дискретних величин. Для характеристики безперервних величин застосовується функція розподілу $F(x)$. Похідна від функції розподілу $f(x)=F'(x)$ характеризує щільність, з якою розподіляються значення випадкової величини в даній точці, і називається щільністю розподілу або щільністю імовірності. Щільність розподілу є одна з форм закону розподілу, а крива $f(x)$ називається кривою розподілу.

1. Числові характеристики випадкових величин.

Одними з основних числових характеристик випадкових величин є середнє значення і середнє квадратичне, або стандартне відхилення.

Середнє значення є характеристикою положення випадкової величини на числовій осі, тобто вказує деяке середнє, орієнтовне значення, навколо якого групуються всі можливі значення випадкової величини.

Воно обчислюється як

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2)$$

де x_1, \dots, x_n – значення випадкової величини,
 n – кількість значень випадкової величини

Середнє квадратичне відхилення є характеристикою ступеня розсіювання значень випадкової величини навколо її середнього значення.

Воно обчислюється як

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

де x_i – поточні значення випадкової величини

Середнє значення і середнє квадратичне відхилення мають розмірність відповідної випадкової величини.

Безрозмірною характеристикою ступеня розсіювання значень випадкової величини навколо її середнього значення є коефіцієнт варіації, який обчислюється за формулою:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

2. Нормальний закон розподілу випадкових величин.

Нормальний закон розподілу випадкових величин – це закон, який найбільш часто зустрічається на практиці. Головна його особливість в тому, що він є граничним законом, до якого наближаються інші закони розподілу.

Крива нормального закону розподілу (рис. 3) симетрична відносно середнього значення \bar{x} , а її положення на осі абсцис визначається величиною середнього значення. Форма кривої нормального закону розподілу визначається величиною середнього квадратичного відхилення σ .

Нормальний закон розподілу характеризується наступною закономірністю: практично всі, а саме 99,73%, значення випадкової величини, яка підлягає нормальному закону розподілу, знаходяться в інтервалі $\bar{x} \pm 3\sigma$. Ця закономірність називається правилом 3σ .

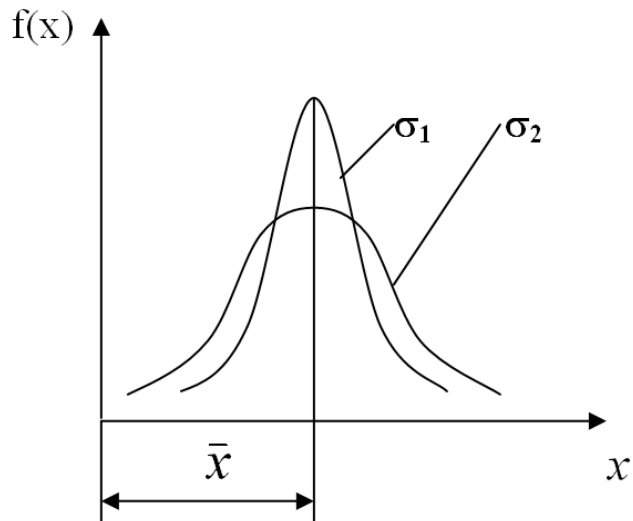


Рис. 3. Криві нормального закону розподілу випадкової величини $\sigma_2 > \sigma_1$

Правило 3σ знаходить застосування при вирішенні практичних задач. Наприклад, при аналізі результатів вимірювань випадкової величини може трапитись ситуація, коли поряд з близькими значеннями вимірів трапляється значення, яке суттєво відрізняється від інших. В цьому випадку виникає питання: "Враховувати значення, яке суттєво відрізняється, в подальшому аналізі результатів вимірювань, чи знехтувати ним?"

Таке питання вирішується наступним чином. Маючи на увазі, що результати вимірювань мають нормальний закон розподілу (для перевірки, чи це дійсно так, існують спеціальні методи), визначають значення \bar{x} і σ випадкової величини без врахування значення, яке суттєво відрізняється. Далі, за обчисленими значеннями будують інтервал $\bar{x} \pm 3\sigma$. Якщо значення, яке суттєво відрізняється, потрапляє в цей інтервал, то його приймають для подальших розрахунків, а якщо виходить за межі інтервалу-то ним нехтують.

За даними варіанту обчислити значення \bar{x} і σ (без врахування значення, яке суттєво відрізняється).

3. Точність розмірів.

В результаті виникнення похибок при обробці дійсні розміри деталей однієї партії різняться між собою, тобто відбувається розсіювання розмірів.

Оскільки діє велика кількість факторів, які не піддаються регулюванню, тому при виготовленні чи відновленні великих партій однакових деталей оцінка точності виготовлення може провадитись з використанням положень теорії ймовірності і математичної статистики.

Похибки можуть бути систематичні, випадкові й грубі (промашки).

Систематичні похибки сталі за значенням і знаком або закономірно змінні.

Джерелом систематичних похибок можуть бути неправильне настроювання верстата, спрацювання та неточність вимірювального інструмента, непрямолінійність напрямних верстата, неточність мірного інструмента тощо.

Значення та знак систематичної похибки заздалегідь можна передбачити і врахувати у тих випадках, коли її неможливо усунути.

Випадкові похибки несталі за значенням і знаком. Передбачити заздалегідь їх значення і знак неможливо, тому що вони не підпорядковані будь-якій закономірності. Джерелом випадкових похибок є пружки й температурні деформації системи верстат — пристосування — інструмент — деталь, неоднорідність механічних властивостей матеріалів, значення припуску тощо. Оцінити їх можна тільки методами теорії ймовірності.

Грубі похибки виникають при допущених грубих помилках, а саме: попадання стружки під встановлену деталь та при вимірюванні, помилки при відліку поділок на лімбі, вимірювальному інструменті.

Запобігти похибкам обробки неможливо, тому при виготовленні чи відновленні деталей відхилення геометричних параметрів від заданих обмежують, забезпечуючи більшу чи меншу точність обробки.

Точність розміру визначається встановленим допуском на обробку.

Точність партії деталей може характеризуватися величинами, які використовуються в теорії математичної статистики.

Велика кількість факторів та їх неоднаковий вплив призводить до того, що значення і знак похибки виготовлення чи вимірювання заздалегідь передбачити неможливо, тобто похибка є випадковою величиною*. Тому для аналізу похибок обробки чи вимірювання використовують положення теорії ймовірності і математичної статистики. Наявність похибок обробки чи вимірювання призводить до розсіювання розмірів в партії деталей чи результатів вимірювання.

4. Статистичні параметри розсіювання.

Аналіз випадкових величин можна виконувати тільки тоді, коли є масив експериментальних даних, представлених таблицею чи графічно у вигляді гістограми чи полігона розсіювання [17].

При побудові гістограми по осі абсцис відкладають розмір, а по осі ординат — відносну частоту:

$$\omega = \frac{n_{xi}}{N} \quad (5)$$

де n_{xi} — частота чи кількість розмірів, які потрапляють в один і той же інтервал; N — загальна кількість розмірів (рис. 4).

Сума прямокутників, шириною яких є прийнятий інтервал розмірів, а висотою відносна частота ω , і є гістограмою [17].

Якщо середини верхньої частинки прямокутників з'єднати прямими лініями, то одержимо ламану лінію, яка є емпіричною кривою розсіювання розмірів, чи полігоном розсіювання. Гістограма і полігон дають наочне уявлення про характер розсіювання випадкової величини (в нашому випадку розміру).

Якби була можливість збільшувати n , то при $n \rightarrow \infty$ полігон перетворився б на криву щільності розсіювання ймовірності p_x , описаної одним із теоретичних законів розсіювання.

На гістограмі чи полігоні розсіювання площа в межах інтервалу дорівнює відносній частоті, а на теоретичній кривій — ймовірність появи розміру в даному інтервалі [17].

Закон великих чисел говорить: з ймовірністю, близькою до достовірної, можна стверджувати, що при достатньо великій кількості дослідів частота спостережуваної події може як завгодно мало відрізнятись від її ймовірності [17].

Виходячи із цього, для практичних розрахунків використовують теоретичні криві розсіювання, одержані апроксимацією гістограм чи емпіричних кривих розсіювання.

Для апроксимації існує ряд теоретичних законів розсіювання.

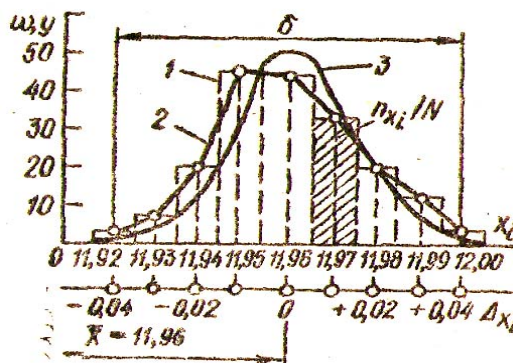


Рис. 4. Гістограма (1), полігон і теоретична крива розсіювання (3)

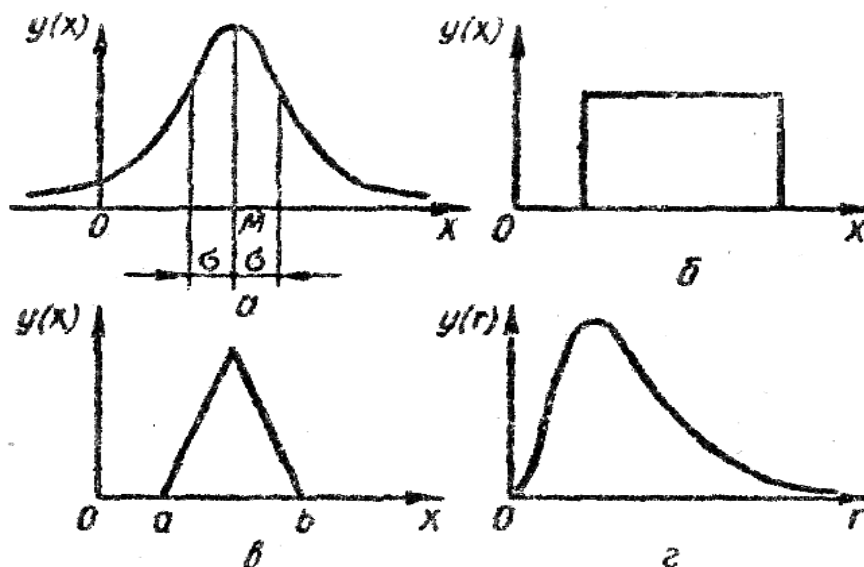


Рис. 5. Закон розсіювання випадкових величин: а — закон нормального розсіювання; б — закон рівної ймовірності; в — закон рівнобедреного трикутника; г — закон ексцентриситета

Дуже поширений закон нормального розсіювання (закон Гауса), який характеризується рівнянням:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \tag{6}$$

Цей закон має місце, коли із великої кількості факторів жоден не є домінуючим, а кожний відіграє відносно малу роль у загальній сукупності (рис. 5, а). Він виражається кривою, розміщеною симетрично відносно центру групування.

Закон нормального розсіювання розмірів часто має місце при обробці деталей, особливо на верстатах-автоматах, а також при вимірюванні розмірів універсальними засобами вимірювання. Закон рівної ймовірності характеризується рівнянням:

$$y = \frac{1}{x_n - x_1} = const \tag{7}$$

Він характерний для випадкових величин, на які впливає різке домінуючий фактор, що рівномірно змінюється в просторі чи часі (рис. 5, б) [17].

Закон Сімпсона (рівнобедреного трикутника) має математичний вираз:

$$y = \begin{cases} \frac{4}{(x_n - x_1)^2} \cdot (x_n - x_1) \text{ при } x_1 < x_n; \\ \frac{4}{(x - x_1)^2} \cdot (x_n - x) \text{ при } x_n > x. \end{cases} \tag{8}$$

Цьому закону підпорядковуються випадкові величини, на які впливають сумарно два домінуючих фактори (рис. 5, в). Закон ексцентриситету (закон Максвелла) має вираз:

$$y = \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{\sigma^2}}. \quad (9)$$

де $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Цьому закону підпорядковуються величини, які можуть мати тільки позитивні значення, наприклад, ексцентриситет, неспіввідносності, торцеве чи радіальне биття, непаралельність і неперпендикулярності двох площин, осі і площини (рис. 5, г).

При апроксимації той чи інший закон вибирають як із загальних міркувань про закон розсіювання, так і виходячи з форми зображення емпіричної розсіювання, яка може допомогти і попередньо вибрати теоретичну криву без розсіювання.

Остаточний висновок вибору закону розсіювання, який характеризує розсіювання випадкової величини, роблять після визначення відповідності експериментальної і теоретичної кривих розсіювання по одному із критеріїв погодження (Критерій Колмогорова, Пірсона тощо).

Знання закону розсіювання випадкової величини дозволяє вирішувати практичні завдання, пов'язані з аналізом точності обробки і вимірювання.

Наближене обчислення закону розсіювання ймовірностей дає його числові характеристики чи моменти. Усі вони — середні величини. Якщо вони відраховуються від початку координат, то моменти називаються початковими, якщо від центру закону розсіювання, то — центральними.

Важливим початковим моментом є перший — середнє значення:

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx \quad (10)$$

яке характеризує математичне очікування.

Чим більша кількість експериментальних даних, тим більше середнє значення наближається до математичного очікування. При обмеженій кількості дослідів:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (11)$$

N — кількість дослідів (розмірів деталей в партії, замірів при вимірюванні).

Мірою розсіювання окремих результатів є другий центральний момент — дисперсія:

$$\sigma_x^2 = (x - \bar{x})^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x)dx \quad (12)$$

Чи середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_x = +\sqrt{\sigma_x^2}. \quad (13)$$

При обмеженій кількості дослідів:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

Якщо кількість дослідів більше 25, то з достатньою достовірністю можна визначити середнє квадратичне відхилення за формулою:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (15)$$

Третій центральний момент є мірою несиметричності розсіювання чи асиметрії:

$$\mu = \frac{(x_1 - \bar{x})^3}{\sigma_x^3}. \quad (16)$$

Четвертий центральний момент характеризує ексцес:

$$V = \frac{(x_1 - \bar{x})^4}{\sigma_x^4}. \quad (17)$$

Функції розсіювання ймовірності і всі моменти мають важливі властивості (якості): будучи характеристиками випадкової величини, самі не є випадковими.

Оскільки практично завжди маємо справу з обмеженою кількістю експериментальних даних, то функції використовуються тільки як математичні моделі.

5. Визначення ймовірного проценту браку.

Вирішення деяких практичних завдань доцільно розглядати на прикладі найбільш поширеного закону нормального розсіювання.

Площа, обмежена кривою нормального розподілу і віссю абсцис (по осі ординат відкладається

щільність ймовірності і $F(x)$ для випадку, коли початок координат збігається а середнім арифметичним значенням, визначається рівнянням:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (18)$$

У теорії ймовірності часто користуються коефіцієнтом ризику:

$$t = \frac{x}{\sigma} \quad (19)$$

Якщо замість x до рівняння ввести коефіцієнт ризику t , то воно набуде вигляду:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (20)$$

Площа, обмежена кривою нормального розподілу і віссю абсцис, дорівнює ймовірності повної сукупності подій, тобто дорівнює одиниці.

При симетричному розміщенні кривої відносно осі у можна записати:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0,5 \quad (21)$$

де $\Phi(t)$ – площа, обмежена кривою і віссю абсцис у межах інтегрування від 0 до ∞ .

Щоб визначити ймовірність того, чи випадкова величина буде в інтервалах від x_1 до x_2 , достатньо встановити відповідні значення (рис. 3):

$$t_1 = \frac{x_1}{\sigma} \quad ; \quad t_2 = \frac{x_2}{\sigma} \quad (22)$$

а шукана величина дорівнюватиме їх різниці:

$$\Phi(t) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) \quad (23)$$

Величину $\Phi(t)$ називають інтегральною функцією, або нормованою функцією Лапласа. Рівняння має вигляд:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (24)$$

З метою обмеження розрахунків значення $\Phi(t)$ наведено в додатку I.

Крива нормального розподілу по обидві сторони асиметрично наближається до осі абсцис. Для практичних розрахунків треба мати обмежене поле розсіювання, яке охоплювало б основну масу подій.

Оскільки основним параметром розсіювання є середнє квадратичне відхилення σ , то поле розсіювання приймають в межах $\pm 3\sigma$. За межами цього поля розсіювання, як видно із додатку I, залишається 0,25 % подій, що для технічних розрахунків цілком прийнято (рис. 4). Таким чином, поле розсіювання V дорівнює:

$$V = 6\sigma \quad (25)$$

Для визначення проценту браку при виготовленні деталей спочатку визначають коефіцієнт ризику t . При нормальному розподілі, коли середина поля допуску збігається з центром розсіювання $x = \frac{T}{2}$.

Якщо в формулу коефіцієнта ризику підставити це значення x , а σ визначити з попереднього рівняння через V , то одержимо:

$$t = \frac{x}{\sigma} = \frac{T}{2\sigma} = \frac{T}{2 \cdot \frac{V}{6}} = 3 \cdot \frac{T}{V} \quad (26)$$

Таким чином, коефіцієнт ризику в цьому випадку показує співвідношення поля допуску і поля розсіювання (рис. 5) для технологічних процесів, які дають різні точність і поле розсіювання (V_1, V_2, V_3).

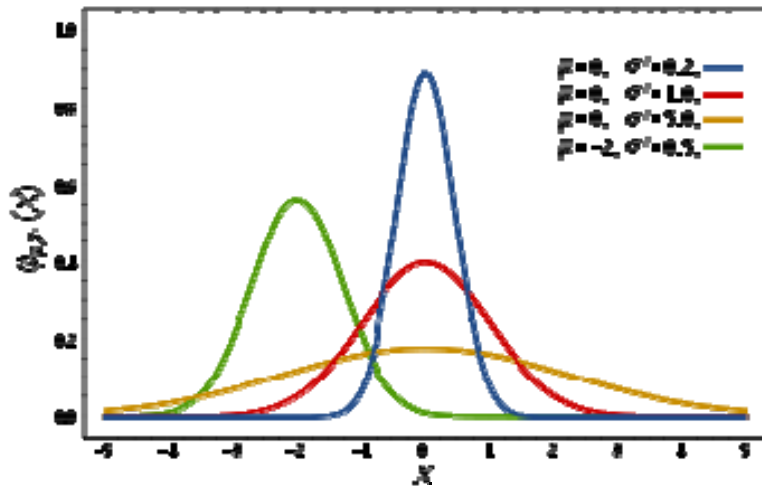
Коли коефіцієнт ризику дорівнює 3, поле розсіювання V_2 дорівнює полю допуску і браку практично не буде (не більше 0,27 %). Якщо ж коефіцієнт ризику понад 3, браку не буде, але процес обробки вибраний надмірно точний, а, значить, дорожчий.

Якщо коефіцієнт ризику менше 3, брак ймовірний, і для вибору оптимального технологічного процесу обробки треба знати ймовірний процент браку.

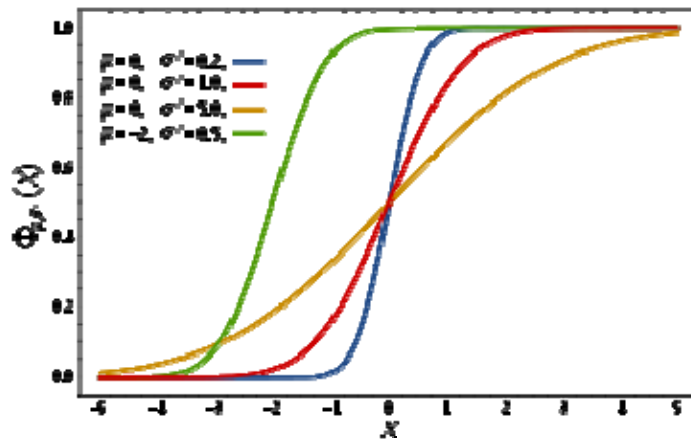
Нормальний розподіл (розподіл Гауса) – розподіл ймовірностей випадкової величини, що

характеризується густиною ймовірності

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (27)$$



Червона крива відповідає стандартному нормальному розподілу.



Нормальний розподіл	
Функція ймовірностей	
Функція розподілу ймовірностей	
Параметри	$\mu \in \mathbf{R}$ — математичне сподівання $\sigma^2 > 0$ — дисперсія
Носій функції	$x \in \mathbf{R}$
Розподіл ймовірностей	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Функція розподілу ймовірностей (cdf)	$\frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{(x-\mu)^2}{\sqrt{2\sigma^2}}\right) \right]$
Середнє	μ
Медіана	μ
Мода	μ
Дисперсія	σ^2
Коефіцієнт асиметрії	0

Коефіцієнт ексцесу	0
Ентропія	$\frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma^2)$
Твірна функція моментів (mgf)	$\exp\left\{\mu t + \frac{1}{2} \sigma^2 t^2\right\}$
Характеристична функція	$\exp\left\{i\mu t - \frac{1}{2} \sigma^2 t^2\right\}$

де μ – математичне сподівання, σ^2 – дисперсія випадкової величини. Параметри σ також відомий, як стандартне відхилення. Розподіл із $\mu = 0$ та $\sigma^2 = 1$ називають стандартом нормальним розподілом.

Центральна гранична теорема стверджує, що нормальний розподіл виникає тоді, коли дана випадкова величина являє собою суму великого числа незалежних випадкових величин, кожна з яких грає в утворенні всієї суми незначну роль. Наприклад, відстань від влучення снаряду гармати до цілі при великій кількості пострілів характеризується саме нормальним розподілом.

Нормально розподілена випадкова величина позначається так: $\xi \approx N(\mu, \sigma^2)$. Якщо генеральна сукупність вимірів нормально розподілена, характеризується ступенем квантування вимірів $[Q]$, не має систематичних похибок, тоді:

– довірчий інтервал для величини X виглядатиме так: [1][2]

$$P(X) = P\left(x_{\min} - \frac{[Q]}{2} < X < x_{\max} + \frac{[Q]}{2}\right) = 1 \quad (28)$$

– з урахуванням ступеня квантування середнє значення μ визначається з імовірністю [3].

$$P(\mu) = 1 \quad (29)$$

Деякі випадкові величини не мають математичного сподівання, в такому випадку значення центрального моменту не визначене. Часто, центральний момент порядку k позначається як μ_k .

Для неперервного одновимірного розподілу ймовірностей з функцією розподілу $f(x)$ центральний момент порядку k відносно середнього v дорівнює:

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - v)^k f(x) dx.$$

Для дискретного одновимірного розподілу з функцією розподілу $p(x)$ центральний момент порядку k відносно середнього v дорівнює:

$$\mu_k = \sum_i (x_i - v)^k p(x_i)$$

Дисперсія випадкової величини - це центральний момент другого порядку.



Рис. 6. Точки відбору зразків ґрунтових проб, отримані з використанням сітки

З врахуванням зазначеної методики можна визначити зони варіабельності сільськогосподарських угідь. Так, наприклад, за допомогою моделювання точок відбору проб без зазначеної методики схема відбору точок складає таким чином (рис. 6).

На основі запропонованої методики можна виділити зони варіабельності (рис. 7).

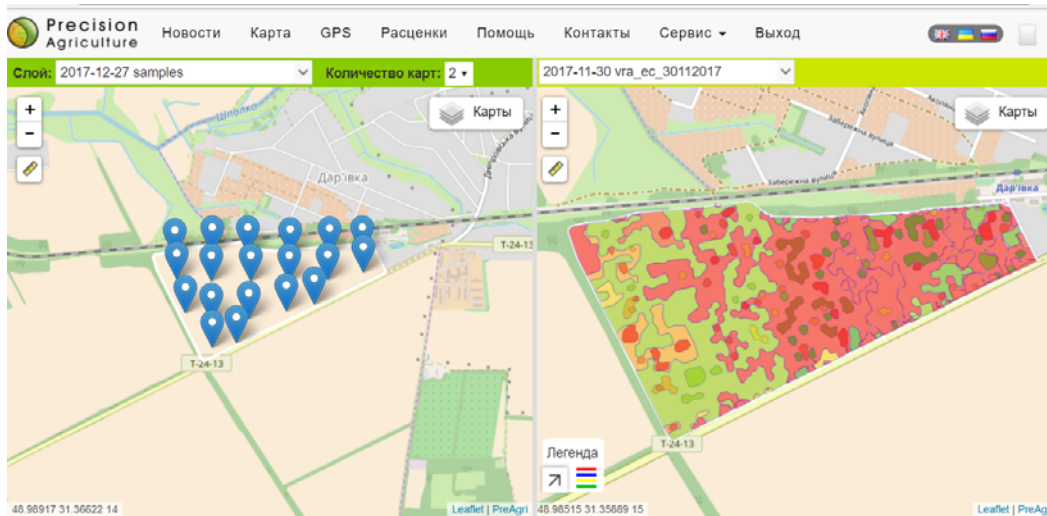


Рис. 7. Точки відбору зразків ґрунтових проб з врахуванням зон варіабельності агробіологічних параметрів ґрунтового середовища

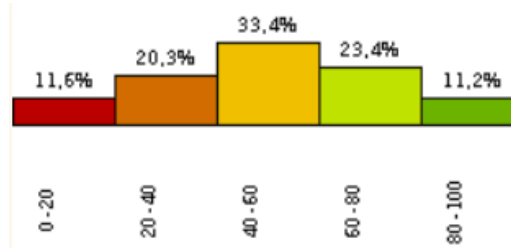


Рис. 8. Дані отримані з використанням інформаційно-технічної системи локального оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь розподілені згідно нормального закону розподілу

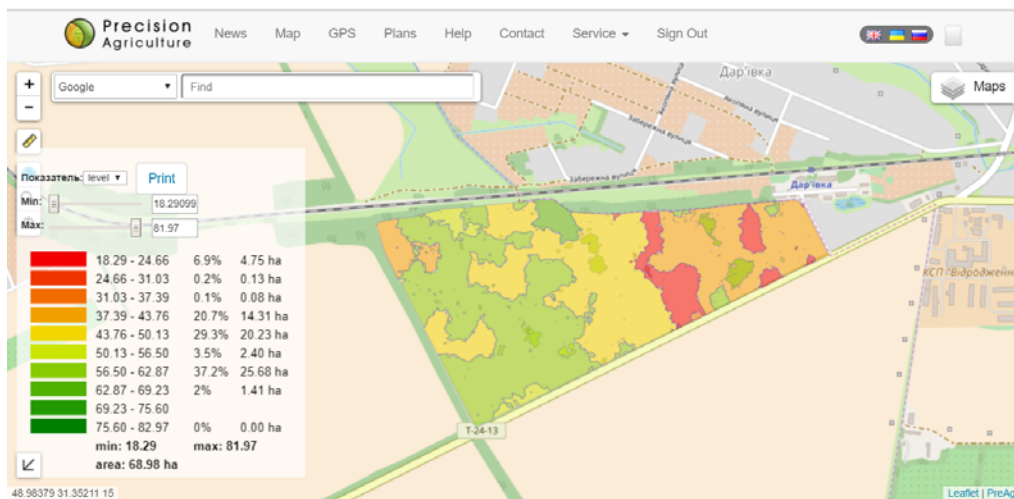


Рис. 9. Зони варіабельності агробіологічного стану сільськогосподарських угідь

Висновок

Запропонована методика з використанням ймовірнісно-статистичних методів визначення величини зон варіабельності агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь для забезпечення належної якості виконання технологічних операцій у рослинництві на основі даних локального оперативного моніторингу дозволяє виділити зони варіабельності та оптимізувати у подальшому точки відбору зразків ґрунтових проб з використанням неоднорідності ґрунтового середовища.

Література

1. Пряха Б. Г. Про точність геодезичних вимірювань / Б. Г. Пряха, Я. В. Білецький // Вісник геодезії

та картографії. — 2003. — № 3(30). — С. 43–49.

2. Пряха Б. Г. Про точність вимірювань / Б. Г. Пряха // Реконструкція житла : науково-виробничне видання. — К. : «Поліграф-експрес», 2006. — Вип. 7. — С. 122–123.

3. Пряха Б. Оцінювання середніх значень / Б. Пряха // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : зб. наук. пр. — Л. : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». — 2007. — Випуск I(13). — С. 140–145.

4. Пряха Б. Означення суми, різниці та добутку випадкових величин / Б. Пряха // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідомчий науково-технічний збірник. — Л. : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». — 2009. — Вип. 72. — С. 41–49.

5. Опейда Й. Глосарій термінів з хімії / Й. Опейда, О. Швайка / Ін-т фізико-органічної хімії та вуглекімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. — Донецьк : Вебер, 2008. — 758 с. — ISBN 978-966-335-206-0

6. Сеньо П.С. Теорія ймовірностей та математична статистика : підручник / Сеньо П.С. — 2-е вид., перероб. і доп. — К. : Знання, 2007. — 556 с. — ISBN 966-346-284-1.

7. Чебышев П.Л. Полное собрание сочинений. Математический анализ / Чебышев П.Л. — М.—Л., 1947. — С. 431.

8. Пряха Б. Оцінювання середніх значень / Б. Пряха // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : Зб. наук. пр. — Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. — Випуск I(13). — С. 140–145.

9. Пряха Б.Г. Про числові характеристики результатів вимірювань / Б.Г. Пряха // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування — Європейський досвід. — Чернігів : ЧДІЕУ, 2008. — С. 97–108. — ISBN 978-966-2188-04-2.

10. Смирнов Н. В. Курс теории вероятности и математической статистики / Смирнов Н. В., Душин-Барковский И. В. — Москва : Наука, 1965.

11. T. Soong (2004). Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers. Wiley. ISBN 0-470-86813-9.

12. Пряха Б. Г. Про числові характеристики результатів вимірювань / Б.Г. Пряха // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування — Європейський досвід. — Чернігів : ЧДІЕУ, 2008. — С. 97–108. — ISBN 978-966-2188-04-2.

13. Walpole Roland E., Myers Raymond H. Probability and Statistics for Engineers and Scientists. — 3-th. edition, Macmillan Publishing Company. — New York, 1985. — 639 p. — ISBN 0-02-424170-9.

14. Пряха Б. Про зв'язок дисперсій та коваріацій / Б.Г. Пряха // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». — 2009. — Вип. 71. — С. 262–271

15. Сірий І.С. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання / Сірий І.С., Колісник В.С. — К. : Урожай. 1995. — 264 с.

References

1. Priakha B. H. Pro tochnist heodezychnykh vymiriuvan / B. H. Priakha, Ya. V. Biletskyi // Visnyk heodezii ta kartohrafi. — 2003. — № 3(30). — S. 43–49.

2. Priakha B. H. Pro tochnist vymiriuvan / B. H. Priakha // Rekonstruktsiia zhytla : naukovo-vyrobnychne vydannia. — K. : «Polihraf-ekspres», 2006. — Vyp. 7. — S. 122–123.

3. Priakha B. Otsiniuvannia serednikh znachen / B. Priakha // Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva : zb. nauk. pr. — L. : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik». — 2007. — Vypusk I(13). — S. 140–145.

4. Priakha B. Oznachennia sumy, riznytsi ta dobutku vypadkovykh velychyn / B. Priakha // Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia : mizhvidomchy naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. — L. : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik». — 2009. — Vyp. 72. — S. 41–49.

5. Opeida Y. Hlosarii terminiv z khimii / Y. Opeida, O. Shvaika / In-t fizyko-orhanichnoi khimii ta vuhlekhimii im. L. M. Lytvynenka NAN Ukrainy, Donetskyi natsionalnyi universytet. — Donetsk : Veber, 2008. — 758 s. — ISBN 978-966-335-206-0

6. Seno P.S. Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka : pidruchnyk / Seno P.S. — 2-e vyd., pererob. i dop. — K. : Znannia, 2007. — 556 s. — ISBN 966-346-284-1.

7. Chebyshev P.L. Polnoe sobrane sochyneni. Matematycheskyi analiz / Chebyshev P.L. — M.—L., 1947. — S. 431.

8. Priakha B. Otsiniuvannia serednikh znachen / B. Priakha // Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva : Zb. nauk. pr. — Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnik", 2007. — Vypusk I(13). — S. 140–145.

9. Priakha B.H. Pro chyslovi kharakterystyky rezultativ vymiriuvan / B.H. Priakha // Novitni dosiahnennia heodezii, heoinformatyky ta zemlevporiadkuvannia — Yevropeyskyi dosvid. — Chernihiv : ChDIEU, 2008. — S. 97–108. — ISBN 978-966-2188-04-2.

10. Smyrnov N. V. Kurs teoryy veroiatnosti y matematycheskoi statystyky / Smyrnov N. V., Dunyn-Barkovskiy Y. V. — Moskva : Nauka, 1965.

11. T. Soong (2004). Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers. Wiley. ISBN 0-470-86813-9.

12. Priakha B. H. Pro chyslovi kharakterystyky rezultativ vymiriuvan / B.H. Priakha // Novitni dosiahnennia heodezii, heoinformatyky ta zemlevporiadkuvannia — Yevropeyskyi dosvid. — Chernihiv : ChDIEU, 2008. — S. 97–108. — ISBN 978-966-2188-04-2.

13. Walpole Roland E., Myers Raymond H. Probability and Statistics for Engineers and Scientists. — 3-th. edition, Macmillan Publishing Company. — New York, 1985. — 639 p. — ISBN 0-02-424170-9.

14. Priakha B. Pro zviazok dyspersii ta kovariatsii / B.H. Priakha // Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia. — Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik». — 2009. — Vyp. 71. — S. 262–271

15. Siryi I.S. Vzaiemozaminnist, standartyzatsiia i tekhnichni vymiriuvannia / Siryi I.S., Kolisnyk V.C. — K. : Urozhai. 1995. — 264 s.

Рецензія/Peer review : 21.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

А.О. СТОПАКЕВИЧ, А.М. ТІГАРСЬВ

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

Т.Г. ТІГАРСЬВА

Одеська державна академія будівництва і архітектури

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДІЛУ НАФТОВИХ ГАЗІВ В РЕКТИФІКАЦІЙНІЙ КОЛОНІ

В роботі запропонована дворівнева каскадна структура системи керування параметрами ректифікаційної колони в технологічному процесі поділу нафтових газів. Запропонована структура дозволяє підтримувати параметри технологічного процесу при значних збуреннях. Обґрунтовано вибір каналів керування. Проведене моделювання показало доцільність застосування в обраній структурі ПІ-регуляторів.

Ключові слова: нафта, нафтовий газ, переробка, ректифікація, пропан, бутан, метан, система керування.

A.O. STOPAKEVYCH, A.M. TIGARIEV

Odessa National O. S. Popov Academy of Telecommunications

T.G. TIGARIEVA

Odessa State Academy of Building and Architecture

OPTIMAL CONTROL OF OIL GAS SEPARATION IN A DISTILLATION COLUMN

The aim of the study is to develop an optimal control system structure for distillation column in oil gas separation process using PI controllers. A technological process of typical composition oil gas separation is described. The material balance of the calculated process is following: from typical composition oil gas with flow rate 11070 nm³/hr it can be produced 90% methane for transportation into gas transmission system with flow rate 9438 nm³/hr, propane-butane with flow rate 882 nm³/hr and non-standard gas with flow rate 750.5 nm³/hr. An analysis of the distillation column steady state and dynamics is provided. The main characteristics of the described distillation column are: highly-nonlinear dynamics, multi-component feed, products as mixtures. So it needs control system structure with increased requirements. Special attention should be devoted to accuracy of the distillation column simulation. A two-level control system structure which uses typical PI (Proportional-Integral) controllers for the distillation column is proposed. The proposed optimal control system structure is described. We suppose that oil gas separation distillation column control system is optimal when it can stabilize parameters in case of disturbances associated with feed flow parameters change. Low level of proposed system includes following control loops: "vapour flow rate – bottom temperature", "distillate flow rate – reflux temperature", "refrigerant flow rate – condenser level". Top level of proposed system stabilizes distillation column top pressure, propane composition in distillate and level in reboiler. Simulation of the control system shows the proposed structure can handle large disturbances that connected with the flow rate and temperature change of distillation column feed.

Keywords: oil, gas, refinery, distillation, propane, butane, methane, control system.

Вступ

В більшості систем автоматизації технологічних процесів (ТП), які включають ректифікаційні колони (РК), використовуються системи керування на базі регуляторів ПІД-типу. Переваги таких регуляторів: простота програмно-технічної реалізації системи керування, стійкість до відмов частини засобів автоматизації, порівняно висока передбачуваність поведінки системи керування.

При реалізації систем керування РК на базі регуляторів ПІД-типу основною проблемою є вибір каналів керування. Ступінь складності обґрунтування вибору залежить від особливостей певного ТП і зростає у випадку поділу багатокомпонентних сумішей й виділення багатокомпонентних продуктів. Прикладом такого процесу є процес переробки нафтового газу, в якому в ректифікаційній колоні в якості основного (нижнього) продукту виділяється пропан-бутан.

Постановка завдання дослідження

Розглядається задача вибору оптимальної структури системи керування для РК в ТП переробки нафтового газу на базі регуляторів ПІД-типу. Під оптимальною структурою будемо розуміти таку, що забезпечує працездатність системи керування при значних збуреннях, що пов'язані зі змінами характеристик потоку живлення РК.

Стисла характеристика ТП переробки нафтового газу

Найпростіший ТП переробки нафтового газу, що може бути застосований для переробки газу за місцем добування нафти, забезпечує виробництво двох основних продуктів: метану і пропан-бутану. Такий процес може бути використаний для переробки нафтового газу без його транспортування на газопереробні заводи. Схему ТП показано на рис. 1.

В розглянутій схемі очищений та осушений нафтовий газ після стиснення в компресорі до тиску в 4 МПа поступає до сепаратора, в якому з газу виділяються рідкі компоненти. Компресор працює на енергії спалення газу.

При підвищеному тиску пропан і бутан переходять до рідкого стану, що дозволяє його грубо відділити їх від метану і етану за допомогою сепаратора. Верхній продукт сепаратора направляється в теплообмінник, де охолоджується газом. Далі охолодження проходить за допомогою чилера, в якому важкі вуглеводні конденсуються для забезпечення в товарному метані необхідної точки роси для транспортування газотранспортною системою (ГТС). Рідкий газ, що сконденсувався в низькотемпературному сепараторі, змішується з рідким газом, який надійшов з вхідного сепаратора. Отримана суміш підігривається і потрапляє

до РК. Нижній продукт РК – пропан-бутан, верхній – несертифікований («жирний газ», що складається переважно з метану, що не виділився при сепарації, етану і невеликої кількості пропану), що використовується для спалювання в переобладнаному газовому котлі.

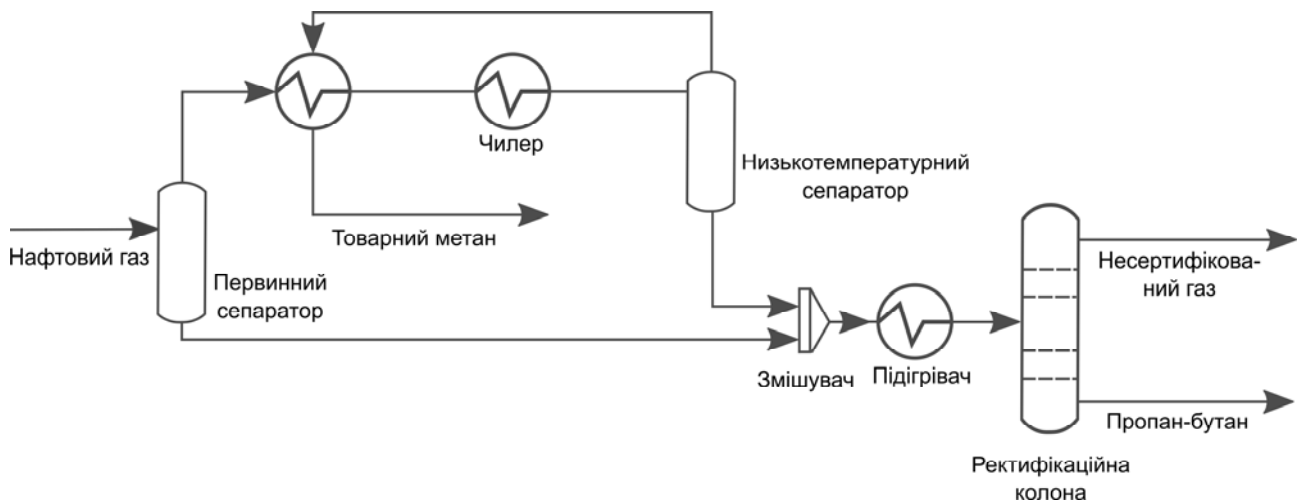


Рис. 1. Схема ТП переробки нафтового газу

Задачу керування технологічним процесом можливо поділити на дві незалежні задачі: стабілізація температурних режимів теплообмінників і стабілізація параметрів РК. Науково-практичний інтерес представляє тільки друга задача.

Конструктивні параметри РК наступні: кількість тарілок – 20, середній ККД тарілки – 66,74%, діаметр тарілки – 1,195 м, відстань між тарілками – 0,6 м, номер живлячої тарілки – 12, об'єм конденсатора – 3,2 м³, об'єм ребойлеру – 7,2 м³.

Технологічні параметри РК наступні: витрата живлення – 2778 кг/год, витрата дистилату – 723,3 кг/год, витрата кубу – 2054 кг/год, температура дистилату – мінус 26 °С, температура нижнього продукту – 71,76 °С.

Обґрунтування вибору засобу моделювання динаміки РК

Моделювання і дослідження динаміки РК є достатньо складною задачею. Використання простих теоретичних моделей для задач дослідження якості перехідних процесів в системі керування на гарантує адекватності отриманих результатів на практиці. Основними допущеннями, які поширені в простих моделях, є такі: тарілки РК мають фіксовану відносну летючість і витрату пари, витрата пари та рідини у верхній та нижній частині РК однакова. Застосування першого припущення в розглянутому випадку може спотворювати точність моделювання динаміки приблизно на 50%, оскільки РК, що використовуються для поділу вуглеводнів, мають далекі від ідеальних криві рівноваги. В розглянутому випадку відносна летючість на 14-й теоретичній тарілці відрізняється від відносної летючості на 6-й в два рази, а на 1-й – в три рази. Крім того, відомо, що зміна тиску і температури також впливає на відносну летючість на кожній тарілці.

Для моделювання динаміки РК використовувалось середовище моделювання HYSYS, результати моделювання якого застосовуються на виробництві. Переваги та проблеми застосування середовища розглянуті в роботах [1–3].

В режимі динаміки середовища були отримані перехідні процеси при збуренні стрибком по основним входним параметрам РК. Перехідні процеси показано на рис. 2.

Наведені перехідні процеси характеризують РК як об'єкт зі значними зв'язками між параметрами, значною інерційністю і неможливістю точного представлення моделей каналів низьким порядком диференціальних рівнянь.

Обґрунтування структури системи керування

Можливо виділити дві основні стратегії вибору змінних для каналів керування РК: прямий і побічний контроль якості кінцевого продукту.

Більш розповсюдженою є пряма стратегія, оскільки підтримання концентрації співпадає з ціллю роботи РК. Процедурі вибору змінних в такій стратегії присвячена велика кількість робіт, однак далеко не всі вони описують її недоліки. Першою проблемою є особливості функціонування датчика концентрації в більшості технологічних процесів. Так, газовий хроматограф – це інерційний датчик, що потребує спеціальної підготовки газу (дотримання заданої температури і тиску). Час роботи типового газового хроматографа складає від 5 до 15 хв, а приведена похибка – 5% [4]. Другою проблемою є ігнорування в цій стратегії особливостей температурного профілю (поділ можливий тільки при досягненні температури кипіння), що робить системи керування, які розроблені за цією стратегією, нестійкими до значних збурень. Таким чином, така стратегія є оптимальною для РК, в яких вимірювання складу ключових компонентів в продукті є нескладним, а збурення незначні. Проблема розробки прямої системи керування для бінарної РК розв'язана в роботі [5].

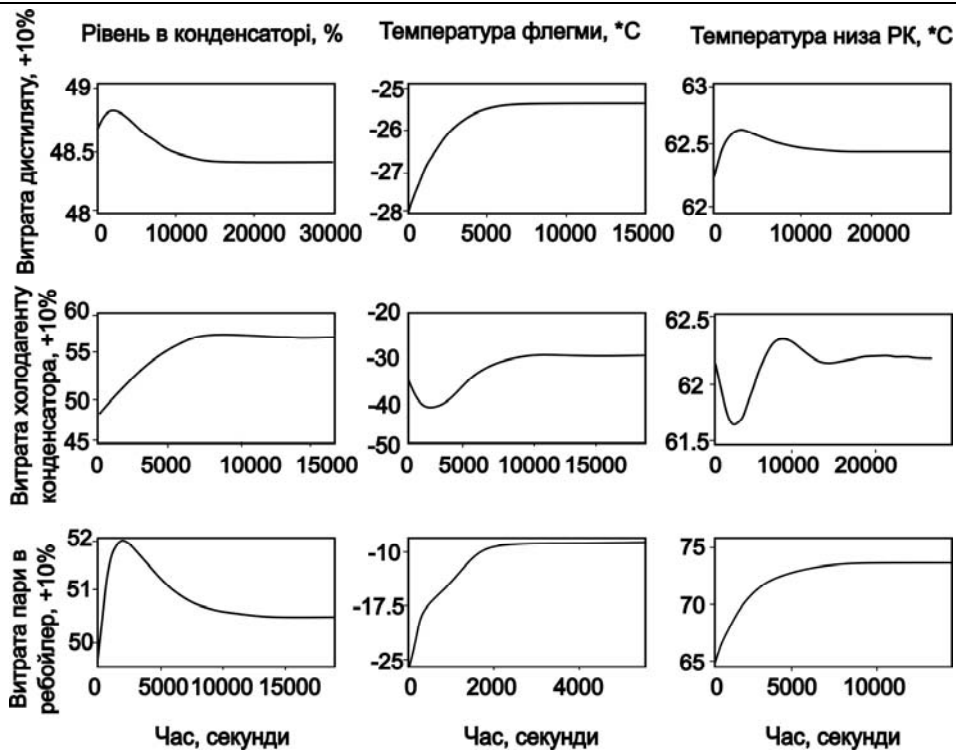


Рис. 2. Перехідні процеси в РК за основними параметрами при збуренні стрибком

При використанні стратегії побічного контролю також виникають проблеми. Типовою задачею побічного контролю є стабілізація температури. Зв'язок температур в різних зонах РК з концентрацією продуктів є лише наближеним і прийнятним для контролю концентрації кінцевого продукту тільки при точній підтримці температурних режимів. Крім того, системи, що побудовані за такою стратегією, також є непрацездатними при великих збуреннях, оскільки зміна концентрації вхідного продукту вимагає зміни режимних значень температури для досягнення бажаної концентрації продуктів. З іншої сторони, температурні датчики є достатньо надійними, малоінерційними й точними, що значно спрощує розробку систем керування, в яких вони застосовуються, і дозволяє врахувати похибку та інші параметри датчика при імітаційному моделюванні перехідних процесів в системі керування [6]. Одним з класичних досліджень систем побічного контролю ректифікаційними колонами, що використовують стабілізацію температурного режиму, є монографія [7]. Альтернативно стабілізації температурного режиму (енергетичного балансу) може ставитись задача стабілізації матеріального балансу для інерційних процесів з відсутністю неперервних датчиків кінцевого продукту та/або з подальшою переробкою продукту РК в наступних колонах. Задача стабілізації матеріального балансу розглянута в роботі [8].

Перспективним напрямом досліджень є поєднання цих двох стратегій. Одним зі шляхів є застосування багатовимірних систем, що керують одночасно температурою, концентрацією, тиском [9]. Інший – шлях застосування багаторівневих систем керування [10].

Дослідження показали, що структурою системи керування для розглянутого технологічного процесу, що є одночасно простою і працездатною при збуреннях по зміні параметрів живлячого потоку РК, є дворівнева структура на базі регуляторів ПІД-типу.

Верхній рівень системи керування має стабілізувати режимні параметри роботи РК, що необхідні для досягнення бажаної концентрації, нижній – температурний режим РК і теплообмінних апаратів. Основною вимогою до нижнього рівня буде забезпечення швидких перехідних процесів, до верхнього – максимальна простота. Система стабілізації температури РК має бути стійкою до збурень при відмові газового хроматографа, тобто при вимкненій стабілізації за концентрацією продукту.

Вибір каналів керування нижнього рівня має проводитись як за величиною коефіцієнту передачі, так і за ступенем лінійності статичної характеристики.

Лінійними можуть вважатись статичні характеристики за каналами «витрата дистилляту – температура флегми», «витрата холодагенту – рівень в конденсаторі», «витрата пари в ребойлер – температура флегми», «витрата пари в ребойлер – температура низу колони».

Аналіз показав, що доцільно обрати наступні канали керування для нижнього рівня: «витрата пари в ребойлер – температура низу», «витрата дистилляту – температура флегми» і «витрата холодагенту в холодильник – рівень в конденсаторі».

Оскільки присутня велика інерційність каналів керування, і ставиться мета спрощення процедури налаштування системи керування, доцільним є застосування ПІ-регуляторів, які серед регуляторів ПІД-типу є одночасно простими в налаштуванні і оптимальними для інерційних процесів. Налаштування регуляторів можливо проводити як інженерними методиками [11], так і за допомогою вирішення оптимізаційної задачі з

застосуванням початкових працюючих налаштувань регуляторів. Задачу оптимізації рекомендується формувати наступним чином: при збільшенні завдань для всіх трьох регуляторів отримати перехідні процеси з заданим максимальним відхиленням (40% від величини завдання) і часом регулювання не більше ніж в системі керування, параметри регуляторів якої отримані за допомогою інженерної методики. Для прискорення вирішення оптимізаційної задачі рекомендується задати діапазони налаштування ПІ-регуляторів в межах відхилення часу інтегрування і коефіцієнту передачі в діапазоні 300% від отриманих за допомогою інженерної методики.

Для забезпечення працездатності системи керування на верхньому рівні доцільно стабілізувати наступні параметри: тиск, концентрація пропану в дистиліаті, рівень в ребойлері. Це можливо забезпечити шляхом використання системи з каскадними ПІ-регуляторами.

Тиск прямо залежить від якості охолодження ректифікаційної колони, тому його стабілізація може бути проведена шляхом каскадного регулювання рівня в конденсаторі.

Концентрація пропану в верхньому продукті залежить як від температури верху, так і від температури низу. Хоча зв'язок концентрації з витратою пари в ребойлер більш значний, безпечнішою виявилась стабілізація концентрації за температурою флегми, оскільки її зміна призводить до конфлікту між регулятором температури флегми і низу колони.

Оскільки невідповідність температури верху і низу колони призводить до збільшення рівня рідини в ребойлері, що може порушити роботу РК, необхідно корегувати завдання за температурою низу для недопущення збільшення рівня рідини.

Структурна схема запропонованої дворівневої системи керування показана на рис. 3.

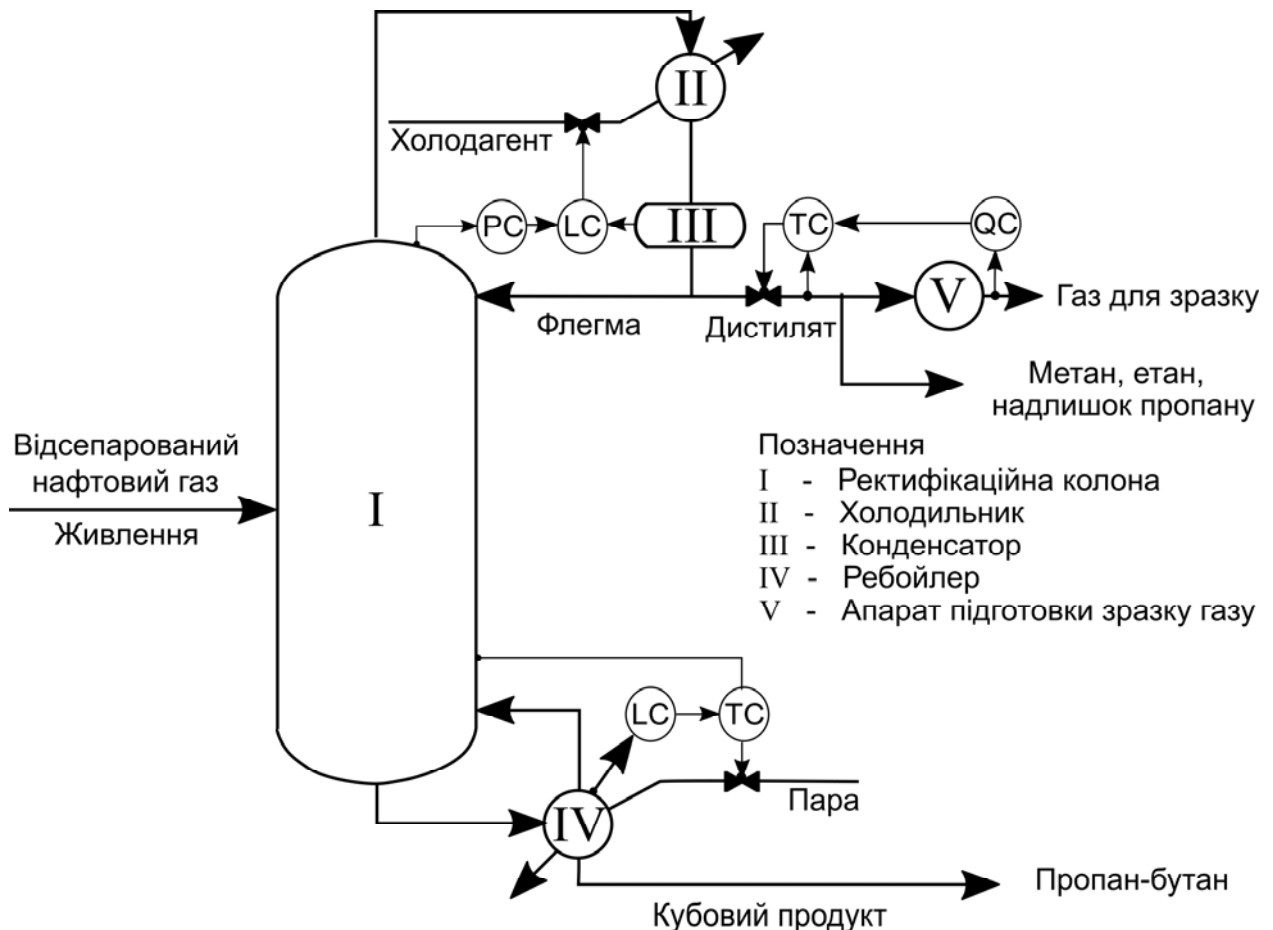


Рис. 3. Схема системи керування РК в ТП поділу НГ

Таким чином, в запропонованій системі керування використовуються наступні контури:
 – ведучий регулятор тиску верху колони, відомий регулятор рівня в конденсаторі з керуючим впливом на витрату холодагенту в охолоджувач верхнього продукту РК;
 – ведучий регулятор концентрації пропану в дистиліаті після підігрівача, відомий регулятор температури флегми з керуючим впливом на витрату дистиліату з РК;
 – ведучий регулятор рівня в ребойлері РК, відомий регулятор температури низу колони з керуючим впливом на витрату пари в ребойлер.

Модельовання системи керування при впливі максимальних збурень

Проведемо модельовання впливу наступних збурень в середовищі моделювання HYSYS:

- збільшення температури живлення на 10°C;
- зменшення витрати живлення на 30%;

– збільшення витрати живлення на 30%.

Перехідні процеси, що отримані в результаті моделювання, показані на рис. 4 та 5.

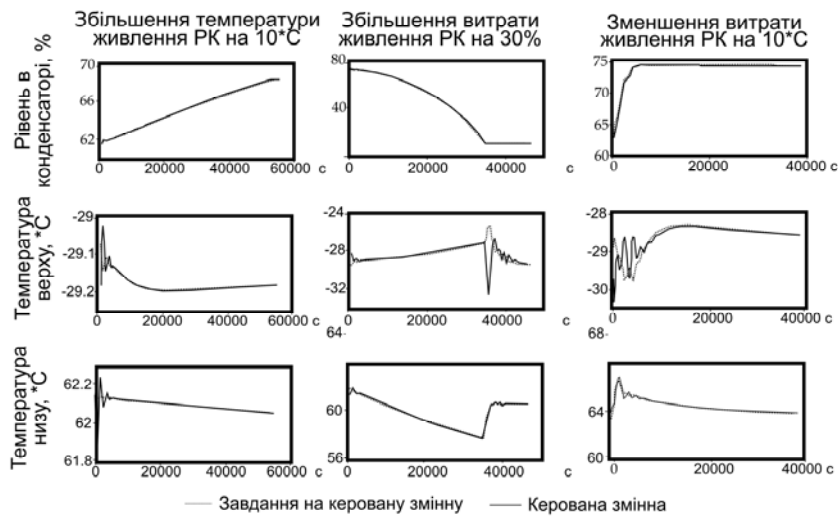


Рис. 4. Перехідні процеси за основними змінними РК при дії збурень

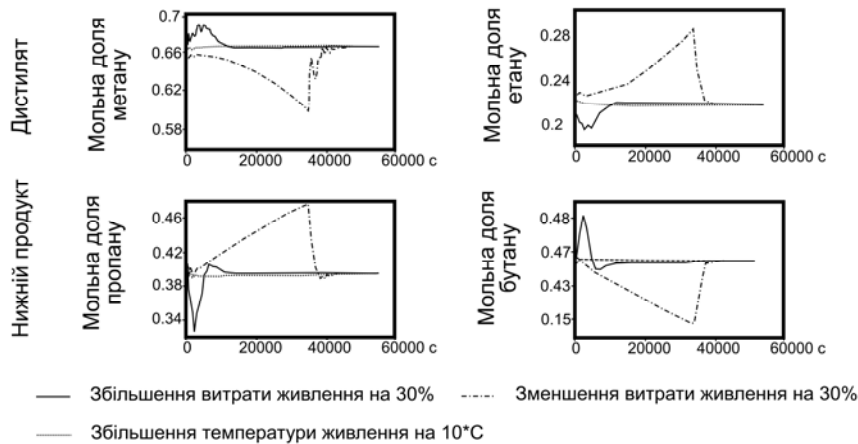


Рис. 5. Перехідні процеси за концентрацією продуктів РК при дії збурень

Аналіз перехідних процесів показує, що система залишилась не тільки працездатною, але й виконала завдання стабілізації концентрації ключових компонентів в вихідних потоках РК при впливі збурень по витраті живлення і його температурі. Слід відзначити, що в реальних умовах відхилення параметрів живлення навряд чи буде стрибкоподібним, тому відхилення параметрів буде значно меншим.

Висновки

Результати моделювання поведінки розробленої системи керування, що проведені в програмі HYSYS, показують переваги запропонованої дворівневої системи керування. Система керування є працездатною при впливі значних збурень за параметрами живлення і справляється зі стабілізацією концентрації ключового продукту. Запропонована система керування може бути використана в виробничих умовах.

Література

1. Пастушенко В. С. Информационно-вычислительная система проектирования технологического процесса утилизации углекислого газа в метанол и системы его автоматизации / В. С. Пастушенко, А. А. Стопакевич, А. А. Стопакевич. // Вісник хмельницького національного університету. – 2016. – № 6. – С. 226–230.
2. Naga K. HYSYS and Aspen Plus in Process Design: A Practical Approach / K. M. N. Naga. – F.R.G. : Lambert Academic Publishing, 2015. – 380 с.
3. Roy P. S. Aspen-HYSYS simulation of natural gas processing plant / P. S. Roy, A. M. Ruhul // Journal of Chemical Engineering. – 2011. – Vol. 26, No 1. – P. 62–65.
4. Дарвай И.Я. Опыт промышленной апробации экспериментальной установки для определения теплоты сгорания природного газа [Электронный ресурс] / И.Я. Дарвай, О.М. Карпаш // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. – 2010. – № 1. – С. 1–9. – Режим доступа : http://ogbus.ru/authors/darvay/darvay_1.pdf.

5. Пастушенко В.С. Модельно-прогнозирующее управление ректификационной колонной в технологическом процессе утилизации углекислого газа в производство метанола / В.С. Пастушенко, А.А. Стопакевич, А.А. Стопакевич // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 6/2(32). – С. 36–40.
6. Стопакевич А.А. Моделирование погрешности датчика температуры при разработке высокоточных ИУС / А.А. Стопакевич // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2015. – № 2. – С. 85–88.
7. Мандельштейн М.Л. Автоматические системы управления технологическим процессом брагоректификации / М.Л. Мандельштейн. – М. : Пищевая промышленность, 1975.
8. Стопакевич А. Разработка робастной системы управления колонной атмосферной перегонки нефти / А. Стопакевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, № 277. – С. 49–57.
9. Стопакевич А.А. Цифровая многомерная система управления технологической установкой / А.А. Стопакевич // Цифрові технології. – 2011. – № 9. – С. 31–35.
10. Стопакевич А.А. Синтез и исследование цифровых систем супервизорного управления колонной ректификации нефти / А.А. Стопакевич, А.А. Стопакевич // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2015. – № 4. – С. 24–33.
11. Стопакевич А. А. Проектирование робастных регуляторов объектами с большим запаздыванием / А. А. Стопакевич, А. А. Стопакевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Вып. 79, № 1. – С. 48–56.

References

1. Pastushenko V. S. Ynformacyonno-vychyslytel'naja sistema proektyrovaniya tehnologicheskogo processa utylyzacyy uglekyslogo gaza v metanol y systemy ego avtomatyzacyy / V. S. Pastushenko, A. A. Stopakevych, A. A. Stopakevych. // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2016. – №6. – S. 226–230.
2. Naga K. HYSYS and Aspen Plus in Process Design: A Practical Approach / K. M. N. Naga. – F.R.G.: Lambert Academic Publishing, 2015. – 380 s.
3. Roy P. S. Aspen-HYSYS simulation of natural gas processing plant / P. S. Roy, A. M. Ruhul // Journal of Chemical Engineering. – 2011. – Vol. 26, No 1. – P. 62–65.
4. Darvaj Y. Ja. Opyt promyshlennoj approbacyy eksperymental'noj ustanovky dlja opredeleniya teploty sgoraniya pryrodnogo gaza / Y. Ja. Darvaj, O. M. Karpash // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2010. – №1. – С.1-9. [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu: http://ogbus.ru/authors/darvaj/darvaj_1.pdf.
5. Pastushenko V.S. Model'no-prognozyrujushhee upravlenye rektyfikacyonnoj kolonnoj v tehnologicheskome processe utylyzacyy uglekyslogo gaza v proyzvodstvo metanola / V.S. Pastushenko, A.A. Stopakevych, A.A. Stopakevych // Tehnologicheskij auyt y rezervy proyzvodstva. – 2016. – №6/2(32). – С. 36-40.
6. Stopakevych A.A. Modelyrovanye pogreshnosti datchyka temperatury pry razrabotke vysokotochnyh YUS / A.A. Stopakevych // Zbirnyk naukovykh prac' Odes'koi' derzhavnoi' akademii' tehnicnogo reguljuvannja ta jakosti. – 2015. – №2. – S. 85-88.
7. Mandel'shtejn M.L. Avtomaticheskiye systemy upravleniya tehnologicheskym processom bragorektyfikacyy / M.L. Mandel'shtejn. – М.: Pyshevejaja promyshlennost', 1975.
8. Stopakevych A. Razrabotka robastnoj systemy upravleniya kolonnoj atmosfernoj peregonky nefty / A. Stopakevych // Vostochno-Evropejskij zhurnal передовых технологий. – 2015. – Т. 5, № 277. – С. 49–57.
9. Stopakevych A.A. Cyfrovaja mnogomernaja sistema upravleniya tehnologicheskoy ustanovkoj / A.A. Stopakevych // Cyfrovi tehnologii'. – 2011. – №9. – S. 31-35.
10. Stopakevych A.A. Syntez y yssledovanye cyfrovyh system supervyzornogo upravleniya kolonnoj rektyfikacyy nefty / A.A. Stopakevych, A.A. Stopakevych // Avtomatyzacija tehnologichnyh i biznes-procesiv. – 2015. – №4. – S. 24-33.
11. Stopakevych, A. A. Proektyrovanye robastnih reguljatorov ob'ektamy s bol'shym zapazdyvanyem / A. A. Stopakevych, A. A. Stopakevych // Vostochno-Evropejskij zhurnal передовых технологий. – 2016. – Вып. 79, № 1. – С. 48–56.

Рецензія/Peer review : 30.4.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кадацький А.Ф.

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

Встановлено, що основним енергетичним джерелом геодинаміки та кліматичних змін на планеті є хвильова трансформація енергії спокою Землі на внутрішньому контактному розриві твердого ядра, границі ядер, границі ядро-мантія та на численних контактних границях в мантії та земній корі. Згенеровані тут кооперативні хвилі обумовлюють наявні варіації частоти обертання Землі, плюм- та плейт-тектоніку, сейсмічність, вулканізм, зміну льодовикових періодів глобальними потепліннями, електромагнітне та вихор-хвильове гравітаційне поле Землі. Ці хвилі інтегруються в динамічні кооперативи гідросфери та атмосфери Землі, що трансформують енергію сонячного випромінювання у хвильову та внутрішню енергію океану та атмосфери. На основі аналізу динаміки віддалення Місяця від Землі та системи Земля-Місяць від Сонця наводяться чисельні оцінки темпу контактної трансформації енергії спокою Землі та Сонця в енергію хвильових рухів, левова частка якої в процесі оберненого енергетичного каскаду передається в космічні системи вищих рангів – Галактику, місцеве скупчення галактик та Метагалактику. Такий механізм по суті вирішує проблему прихованої маси і темної енергії у Космосі: тобто під останніми слід розуміти масу та енергію спокою космічних об'єктів, що контактено трансформуються у хвильові гідродинамічні рухи та відповідні їм за топологією вихор-хвильові гравітаційні та електромагнітні поля. Запропонований новий механізм утворення Місяця в результаті раптового зменшення енергії спокою Землі при виникненні внутрішнього контактного розриву в кристалічному ядрі на ранніх етапах еволюції планети. Аналогічні механізми пояснюють утворення численних супутників планет-гігантів Сонячної системи. Стверджується, що внаслідок оберненого енергетичного каскаду в системі кооперативних хвиль тіло Землі розширюється (субдукція не компенсує спредин), а її густина поступово зменшується. Значно більш вираженим є такий процес на планетах-гігантах. Спростовується антропогенний механізм сучасного глобального потепління та робиться висновок про його фактичний спад і перспективу нового льодовикового періоду. Розгляд ведеться в концепції трійстого гіперкомплексного спірального часу та комплексного евклідового простору, що забезпечують поширення кооперативних вихор-хвильових структур гідродинамічного, гравітаційного та електромагнітного поля.

Ключові слова: контактне динамо, кооперативні хвилі, темна енергія спокою, геодинаміка, клімат, глобальне потепління, льодовиковий період, гіперкомплексний спіральний час, комплексний евклідів простір.

YU. P. ZASPA

Khmelnitsky National University

COOPERATIVE CONTACT DYNAMICS OF WAVE STRUCTURES IN A HYPERCOMPLEX SPIRAL TIME AND IN A COMPLEX EUCLIDEAN SPACE AS THE BASIS OF GEODYNAMICS AND WAVE EARTH CLIMATE CHANGES. THE ACTUAL DECREASE OF GLOBAL WARMING AND THE PROSPECT OF A NEW GLACIAL PERIOD

It is established that the main energy source of geodynamics and climate changes on the planet is the wave transformation of the rest energy of the Earth on the internal contact rupture of the solid core, the boundaries of cores, the boundaries of the cores-mantle and the numerous contact boundaries in the mantle and the earth's crust. The co-operative waves that are generated determine the variations in the frequency of the Earth's rotation, the plume and the plate-tectonics, seismicity, volcanism, the change of glacial periods by global warming, the electromagnetic and vortex-wave gravitational fields of the Earth. These waves are integrated into the dynamic co-ops of the hydrosphere and the Earth's atmosphere, transforming the energy of solar radiation into the wave and internal energy of the ocean and atmosphere. On the basis of the analysis of the dynamics of the distance of the Moon from the Earth and the Earth-Moon system from the Sun, numerous the calculations are made. Such as the calculation of the contact transformation pace of the rest energy of the Earth and the Sun into the energy of wave motions, the lion's share of which in the process of the reverse energy cascade is transmitted to higher-level cosmic systems - the Galaxy, galaxies accumulations and Metagalaxy. Such a mechanism, in fact, solves the problem of hidden mass and dark energy in Space: the latter one should be understood as the mass and energy of the rest of the space objects that are interconnected in the wave hydrodynamic motions and corresponding to them in the topology of vortex-wave gravitational and electromagnetic fields. A new mechanism of the Moon formation as a result of the sudden reduction of the rest energy of the Earth in the event of an internal contact rupture in the crystalline core in the early stages of the evolution of the planet is proposed. The same mechanisms explain the formation of numerous satellites of the giant planets of the Solar system. It is substantiated that as a result of the inversed energy cascade in the system of cooperative waves the Earth's body expands (subduction does not compensate for spreading), and its density decreases gradually. Such process is significantly stronger on planet-giants. Anthropogenic mechanism of modern global warming is refuted and a conclusion about its actual decline and the prospect of a new glacial period is made. The research is kept in the concept of a trihedral hypercomplex spiral time and a complex Euclidean space, which provides the spread of cooperative vortex-wave structures of the hydrodynamic, gravitational and electromagnetic fields.

Keywords: contact dynamo, co-operative waves, dark rest energy, geodynamics, climate, global warming, glacial period, hypercomplex spiral time, complex Euclidean space.

Вступ

На сьогодні в галузі геодинаміки та кліматології накопичилось чимало питань принципового

характеру, що не мають адекватного вирішення в рамках існуючих уявлень та концепцій. Зокрема, активно насаджується ідея тривалого глобального потепління, обумовленого антропогенними викидами в атмосферу парникових газів [1]. Основним енергетичним джерелом змін клімату планети вважається сонячне випромінювання, а довготривала циклічність клімату пов'язується з варіаціями його інтенсивності [1]. Т.з. глибинна геодинаміка [2], що прийшла на зміну плитній тектоніці, декларує суто конвективний сценарій мантийних процесів без вирішення кардинальної проблеми – встановлення енергетичного джерела цих процесів (роль якого навімання відводиться радіоактивному розпаду, або ж теплу гравітаційної диференціації мас). Генерація глобального магнітного поля вже традиційно приписується гідромагнітному динамо в рідкому ядрі Землі без будь-якого підтвердження реальності такого механізму. Добре відомі вікові варіації періоду обертання Землі, а також нещодавно встановлене систематичне віддалення Місяця від Землі [3] та системи Земля-Місяць від Сонця [4, 5] розглядаються в рамках застосування закону збереження моменту імпульсу. Цей же закон покладено в основу пояснення механізму виникнення геодинамічних хвиль [6]. В той же час відсутнє розуміння походження «аномально» великого моменту імпульсу системи Земля-Місяць, як, власне, і походження самого Місяця. Несподівано високі неприливні варіації гравітаційного поля Землі [7] та явно виражені різномасштабні часові варіації результатів динамічних вимірювань сталої всесвітнього тяжіння [8] не знаходять пояснень експериментаторів. Ці проблеми накопичуються в умовах настійливого пошуку чорної матерії та енергії у Всесвіті. Наявна криза в геофізиці та у фізиці загалом пояснюється недооцінкою ролі вельми специфічних контактних-наведених хвильових процесів у Космосі, що розглядалися раніше в концепції т.з. контактного динамо [9, 10] (для уникнення небажаного надмірного самоцитуювання тут наводяться лише перша та остання частини роботи). В розвиток цієї концепції нижче встановлюється основне енергетичне джерело такого роду процесів, що безпосередньо вирішує перераховані вище геофізичні та космологічні проблеми. Розгляд ведеться на основі переходу до гіперкомплексного спірального часу та комплексного евклідового простору, що підтримують поширення кооперативних хвиль.

Троїстий гіперкомплексний спіральний час

Загальновідоме об'єднання простору і часу в чотирьохвимірній простір-час історично походить від широкого застосування кватерніонів у XIX ст. [11]. Дискримінація часу тут виражена в його одномірності – тільки вперед. Тобто у відсутності операції повороту, дуже звичної у просторі. Спроби виправити ситуацію за рахунок переходу до тривимірних фінслерових метрик часу [12] видаються вельми штучними за винятком основної ідеї такого підходу – тривимірності часу.

Для забезпечення такої тривимірності тут пропонується використати гіперкомплексні числа з двома уявними одиницями. Такі числа, як відомо [11], не утворюють повну алгебру через відсутність операції ділення. Це, власне, й вивело їх з поля зору математиків та фізиків (на відміну від кватерніонів). Зауважимо, однак, що у векторній алгебрі також відсутня операція ділення на вектор, що аж ніяк не завадило якнайширшому застосуванню векторної алгебри у фізиці. Більше того, така подібність двох алгебр математично забезпечує поширення у просторі та часі хвильових кооперативних структур, що розглядаються нижче.

Операції множення уявних одиниць приймаються комутативними, однак, неасоціативними (як і операції скалярного добутку векторів):

$$i^2 = j^2 = -1, ij = ji = +1, i(ij) \neq (ii)j, j(ji) \neq (jj)i \quad (1-4)$$

Троїстий гіперкомплексний час має три компоненти:

$$t = t' + it'' + jt''' \quad (5)$$

де t' – дійсна компонента, t'' , t''' – уявні компоненти. Графічно момент часу t зображається точкою у тривимірному числовому просторі з одиницями $1, i, j$. Хід часу зазвичай спіральний (рис. 1).

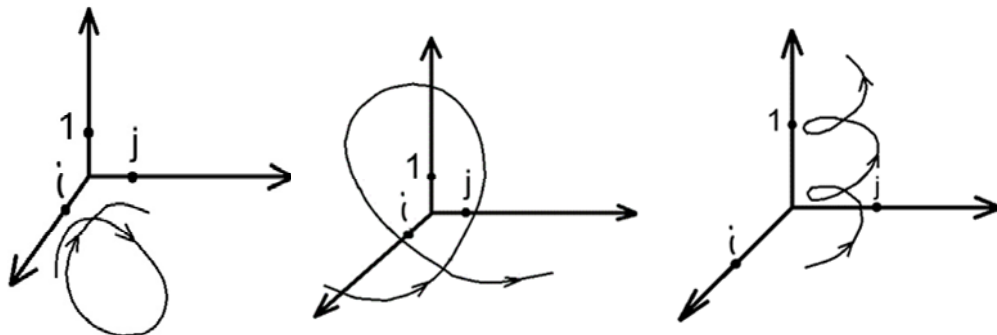


Рис. 1. Спіральний хід троїстого часу з переважно уявними (зліва), змішаними (посередині) та з переважно дійсною (справа) компонентами.

Метрика троїстого часу додатно визначена:

$$\|t_1 - t_2\|^2 = (t_1 - t_2, t_1 - t_2) = (t_1 - t_2) \cdot (t_1 - t_2)^* = (t'_1 - t'_2)^2 + ((t''_1 - t''_2) - (t'''_1 - t'''_2))^2 \geq 0 \quad (6)$$

Тут t_1, t_2 – два моменти часу, зірочка позначає комплексне спряження, тобто заміну i на $-i$, j на $-j$.

Одночасність тут може бути нетривіальною (рис. 2), тобто:

$$\|t_1 - t_2\| = 0 \text{ і } \delta t'_1 - t'_2 = 0, t''_1 - t''_2 \neq 0, t'''_1 - t'''_2 \neq 0 \quad (7)$$

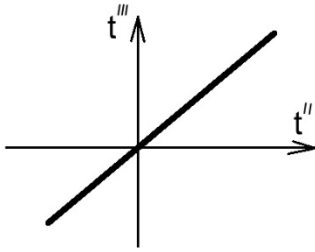


Рис. 2. Нетривіальна одночасність трійстого часу.

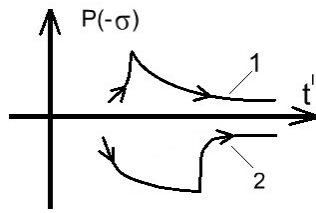


Рис. 3. Часові залежності контактних напружень стиску (1) та зсуву (2).

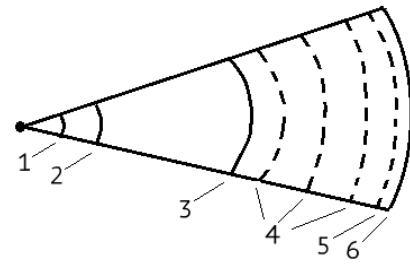


Рис. 4. Схема контактних розривів та внутрішніх границь Землі: 1 – внутрішній контактний розрив твердого ядра, 2 – границя ядра, 3 – границя ядро-мантія, 4 – контактні розриви мантії, 5 – астеносфера, 6 – границя мантія – кора

Додатна визначеність метрики трійстого часу суттєво відрізняє її від індефінітної метрики чотирьохвимірному простору – часу теорії відносності (яка, власне, і не є метрикою, а лишень метричним тензором).

Комплексний евклідів простір

В галузі технічної вібродинаміки [13] та в електродинаміці формально вводиться комплексний евклідів простір з двома скалярними добутками векторів – першим (для математичних операцій над векторними полями) та другим (для визначення норми вектора). В той же час в теоретичній фізиці під комплексним евклідовим простором зазвичай розуміється унітарний простір лише з одним (другим) скалярним добутком векторів. В даному випадку ми дотримуємось технічної термінології [13] з двома скалярними добутками, вважаючи, однак, такий комплексний простір не формально введеним, а таким, що по суті забезпечує поширення контактено-наведених кооперативних хвиль. В даному просторі вводиться ортонормований дійсний базис $(0, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$:

$$\vec{e}_n \cdot \vec{e}_m = \begin{cases} 1, & n = m (n, m = 1, 2, 3) \\ 0, & n \neq m \end{cases} \quad (8)$$

Радіус вектор \vec{r} тут має комплексні координати:

$$\vec{r} = x \cdot \vec{e}_1 + y \cdot \vec{e}_2 + z \cdot \vec{e}_3 = (x_R + ix_I) \cdot \vec{e}_1 + (y_R + iy_I) \cdot \vec{e}_2 + (z_R + iz_I) \cdot \vec{e}_3, \quad (9)$$

де символом R позначені дійсні компоненти координат, символом I – уявні (величини $x_R, x_I, y_R, y_I, z_R, z_I$ – дійсні).

Метрика такого простору додатно визначена з тривіальною «однолокальністю»:

$$\|\vec{r}_1 - \vec{r}_2\|^2 = (\vec{r}_1 - \vec{r}_2, \vec{r}_1 - \vec{r}_2) = (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^* = (x_1 - x_2)_R^2 + (x_1 - x_2)_I^2 + (y_1 - y_2)_R^2 + (y_1 - y_2)_I^2 + (z_1 - z_2)_R^2 + (z_1 - z_2)_I^2 \geq 0 \quad (10)$$

Нижче при здійсненні операцій над векторами застосовується переважно перший скалярний добуток векторів, аналогічний скалярному добутку в дійсному евклідовому просторі.

Контактно-наведені кооперативні хвилі

Рівняння таких хвиль запишемо у вигляді [9, 10]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{V}) \vec{V} = \pm v_{co} \cdot (\Delta \vec{V} \mp \frac{1}{v_{ph}^2} \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial t^2}) \quad (11)$$

Тут \vec{V} – вектор-потенціал поля (гідродинамічного, електромагнітного, гравітаційного), t – час, $\vec{\nabla}$ – оператор набла, Δ – оператор Лапласа, v_{ph} – фазова швидкість хвилі, v_{co} – кооперативна в'язкість системи.

Знак плюс перед v_{co} відповідає дисипативним хвилям, знак мінус – «інсипативним» (пояснюється нижче).

Внутрішні знаки в дужках правої частини (11) відповідають електромагнітному (мінус) та гравітаційному (плюс) типу полів.

Рішення (11) шукатимемо у вигляді [9, 10]:

$$\vec{V}(t, \vec{r}) = \vec{V}_a \cdot e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}, \quad (12)$$

де \vec{V}_a – комплексна амплітуда, ω, \vec{k} – циклічна частота та хвильовий вектор, причому

$$\omega = \omega_R + i\omega_I, \vec{k} = \vec{k}_R + i\vec{k}_I, \quad (13, 14)$$

$$\vec{r} = \vec{r}_R + i\vec{r}_I, t = t' + it'' + jt''' \quad (15, 16)$$

де $\omega_R, \omega_I, \vec{k}_R, \vec{k}_I, \vec{r}_R, \vec{r}_I, t', t'', t'''$ – дійсні величини.

В таких позначеннях рішення (12) переписеться у вигляді:

$$\vec{V}(t, \vec{r}) = \vec{V}_a \cdot e^{\vec{k}_R \cdot \vec{r}_I - \omega_R(t'' - t''')} \cdot e^{\vec{k}_I \cdot \vec{r}_R - \omega_I t'} \cdot e^{i(\omega_R t' - \vec{k}_R \cdot \vec{r}_R)} \cdot e^{i(\vec{k}_I \cdot \vec{r}_I - \omega_I(t'' - t'''))} \quad (17)$$

Як видно, воно є добутком чотирьох хвильових функцій різного виду. Перші дві задають пульсаційну форму руху, останні дві – гармонічну.

Підставляючи (12) в (11) у першому наближенні [9, 10] отримуємо наступне дисперсійне співвідношення:

$$\omega = \vec{k} \cdot \vec{V} \quad (18)$$

Записавши вектор-потенціал \vec{V} у вигляді

$$\vec{V} = \vec{V}_R + i\vec{V}_I, \quad (19)$$

де \vec{V}_R, \vec{V}_I – дійсні величини, з (13, 14, 18) отримаємо:

$$\omega_R = \vec{k}_R \cdot \vec{V}_R - \vec{k}_I \cdot \vec{V}_I, \omega_I = \vec{k}_R \cdot \vec{V}_I + \vec{k}_I \cdot \vec{V}_R \quad (20, 21)$$

Групова швидкість хвиль

$$\vec{v}_{gr} = \frac{\partial \omega}{\partial \vec{k}} = \vec{V} \quad (22)$$

Квадрат фазової швидкості хвиль:

$$v_{ph}^2 = \pm \frac{\omega^2}{(\vec{k})^2}, \quad (23)$$

де знак плюс відповідає хвилям електромагнітного типу, знак мінус – хвилям гравітаційного типу.

Неважко показати, що суто дійсні або ж суто уявні значення \vec{V} не є рішеннями рівняння (11). Отже, як групова, так і фазова швидкості кооперативних хвиль є комплексними величинами.

З умови переважання членів лівої (топологічної) частини (11) за модулем над членами правої частини (11) отримуємо наступне дисперсійне рівняння:

$$|\omega| = N_{ch} \cdot v_{co} \cdot |(\vec{k})^2|, \quad (24)$$

де N_{ch} – параметр когерентності [9, 10]. Ввівши період T та довжину λ хвилі згідно зі співвідношеннями

$$|\omega| = 2\pi / T, |(\vec{k})^2| = 4\pi^2 / \lambda^2 \quad (25, 26)$$

з (24) отримаємо:

$$\lambda^2 / T = 2\pi N_{ch} \cdot v_{co} \quad (27)$$

Це рівняння дозволяє визначити кооперативну в'язкість системи за дослідними значеннями λ, T, N_{ch} [9, 10].

Довжину хвилі λ можна ввести також дещо іншим чином, врахувавши, що

$$|(\vec{k})^2| = ((k_R^2 - k_I^2)^2 + 4(k_R k_I \cdot \cos \theta)^2)^{1/2}, \quad (28)$$

де θ – кут між векторами \vec{k}_R та \vec{k}_I , та вважаючи, що

$$k_R = k_I = 2\pi / \lambda \quad (29)$$

Тоді з (24) матимемо:

$$\frac{\lambda^2}{T} = 4\pi N_{ch} \cdot v_{co} \cdot |\cos \theta| \quad (30)$$

або ж

$$\frac{\lambda^2}{\tau} = 4\pi v_{co} \cdot |\cos \theta|, \quad (31)$$

$$\text{де } \tau = N_{ch} \cdot T \quad (32)$$

– час життя структури поля. Наявність фактору косинуса у правій частині (30-31), обумовлена комплексним розширенням евклідового простору, пояснює існування вельми довготривалих (порівняно з

подібними за розмірами) топологічних структур: блокуючих антициклонів в атмосфері Землі, тропічних циклонів з «аномальною» тривалістю близько місяця, Великої червоної плями на Юпітері, Гексагону в атмосфері Сатурна і т.п.

Об'ємна густина енергії хвильового поля задається наступним чином [9, 10]:

$$w = \pm \frac{\epsilon \cdot (\vec{E})^2}{8\pi g} + \frac{(\vec{B})^2}{8\pi \mu g}, \quad (33)$$

де знак плюс відповідає хвилям електромагнітного типу, знак мінус – хвилям гравітаційного типу,

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} - \vec{\nabla}((\vec{V})^2 / 2), \quad \vec{B} = c \cdot \text{rot} \vec{V} \quad (34, 35)$$

Тут ϵ, μ – безрозмірні параметри, g – калібрувальна константа поля з розмірністю сталої всесвітнього тяжіння [9, 10], c – швидкість світла у вакуумі.

Оскільки \vec{E} та \vec{B} – комплексні величини, об'ємна густина енергії хвильового поля – теж комплексна величина.

Введемо вектор густини потоку хвильової енергії поля:

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi \mu g} \cdot [\vec{E} \times \vec{B}] \quad (36)$$

Враховуючи, що у першому наближенні [9, 10] справедливі співвідношення

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = i\omega \vec{V}, \quad \vec{\nabla}((\vec{V})^2 / 2) = -i\vec{k}(\vec{V})^2, \quad \text{rot} \vec{V} = -i[\vec{k} \times \vec{V}] \quad (37-39)$$

з виразів (18, 34-36) отримаємо:

$$\vec{S} = \frac{c^2}{4\pi \mu g} \cdot [(\vec{k} \cdot \vec{V})^2 - (\vec{k})^2 \cdot (\vec{V})^2] \cdot \vec{V} \quad (40)$$

На основі попереднього аналізу системи рівнянь Максвелла для електромагнітного поля та відповідних аналогів для вихрового гравітаційного поля [9, 10] слідує рівняння енергетичного балансу:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{\nabla} \vec{S} \pm (\vec{E} \cdot \vec{j}) = 0, \quad (41)$$

$$\vec{j} = \vec{j}_{cv} \pm \sigma_{co} \cdot (\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{V} \times \vec{B}]) \quad (42)$$

Тут \vec{j}_{cv} – густина конвективного (адвективного) струму,

$$\sigma_{co} = \frac{c^2}{4\pi \mu \nu_{co} \cdot g} \quad (43)$$

– кооперативна провідність. Верхній знак плюс в (41) відповідає хвилям електромагнітного типу, знак мінус – хвилям гравітаційного типу. Подвійність знаків у (42) враховує наявність як дисипативних, так і «інсипативних» хвиль для кожного сорту полів. «Інсипативні» електромагнітні хвильові структури в космічних системах наочно проявляються, наприклад, у вигляді сонячних плям, температура яких значно нижча за середню по фотосфері.

Робота поля йде не тільки на переміщення частинок середовища (\vec{j}_{cv} в (42)), але й на забезпечення кооперативного хвильового руху самого поля у просторі (останній член правої частини (42), що відповідає густині кооперативного струму провідності).

Об'ємна густина потужності магнітної компоненти сили Лоренца теж має нетривіальне значення:

$$\frac{1}{c} [\vec{V} \times \vec{B}] \cdot \vec{j} = \pm \frac{\vec{V}}{4\pi \mu g} \cdot [\vec{B} \times \text{rot} \vec{B}] + \frac{\epsilon \mu}{c^2} \vec{V} \cdot \frac{\partial \vec{S}}{\partial t} + \frac{\epsilon \vec{V}}{4\pi g} \cdot [\vec{E} \times \text{rot} \vec{E}] \quad (44)$$

Загальний енергетичний баланс зводиться з врахуванням обох співвідношень (41, 44):

$$(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{V} \times \vec{B}]) \cdot \vec{j} = \pm \frac{\vec{V}}{4\pi \mu g} \cdot [\vec{B} \times \text{rot} \vec{B}] \mp \frac{\partial w}{\partial t} \mp \vec{\nabla} \vec{S} + \frac{\epsilon \mu}{c^2} \vec{V} \cdot \frac{\partial \vec{S}}{\partial t} + \frac{\epsilon \vec{V}}{4\pi g} \cdot [\vec{E} \times \text{rot} \vec{E}] \quad (45)$$

Оскільки у першому наближенні розв'язання задачі об'ємна густина повної сили Лоренца у лівій частині (45) зануляється [9, 10], то енергетичний баланс у цьому наближенні забезпечується одночасним зануленням правої частини (45). Однак, для «розморожування» гідродинамічного поля завихореності (а також магнітного і «магнітно»-гравітаційного поля) слід вийти за рамки першого наближення, що переводить розгляд задачі у топологічну площину [9, 10].

Для гідродинамічного поля швидкості \vec{V} можлива реалізація як дисипативних, так й «інсипативних» хвильових форм руху з обома знаками у (42). При цьому змішування конвективної (адвективної) та хвильової складової у (42, 45) формально сприяє взаємотрансформації корпускулярних та хвильових властивостей матеріального середовища, що не має аналогів в рамках застосування відомих законів зміни імпульсу та поняття силової взаємодії елементів середовища.

Контактна трансформація енергії спокою космічних об'єктів в енергію хвильового руху

Постулювання енергії спокою матеріальних частинок стало визначним досягненням спеціальної теорії відносності Ейнштейна на відміну від заборони на рух із надсвітловими швидкостями та подальших перекинувань загальної теорії відносності. Енергія спокою цілком відсутня в Ньютоновій динаміці, так само як і в класичній термодинаміці. Її латентна присутність ніяк не виражається ні в рівняннях гідродинаміки, ні в класичних законах збереження та зміни енергії. Вважається, що врахування енергії спокою в «земних умовах» необхідно лише в сфері ядерних реакцій, прискорення та взаємних перетворень елементарних частинок. З іншого боку, енергія спокою, як і внутрішня енергія об'єктів космічного масштабу, ніяк не враховується класичною теоремою віріала, застосування якої, власне, і породило одіозну проблему прихованої маси та темної енергії у Космосі.

Однак, як виявилось, контактне перетворення саме енергії спокою матеріальних об'єктів в енергію хвильових форм руху таких об'єктів і пояснює наявний дефіцит маси в космічних системах. Не менш парадоксальною виглядає також можливість контактної «утилізації» енергії спокою в хвильову енергію в звичайних технічних системах (на кшталт руху тіл кочення та ковзання похилою площиною або ж блокової системи вантажів), яка дозволяє пояснити наявні енергетичні дисбаланси та ефекти від'ємного тертя в цих системах [14, 15]. Перехід в автохвильовий режим контактної взаємодії [14, 15] пов'язаний із зміною знаку енергії зв'язку системи – з від'ємного для адгезійних сил притягання на додатний для сил відштовхування. При цьому наявна часова асиметрія фаз контактної навантаження та релаксації (рис. 3) дозволяє трансформувати енергію спокою системи в енергію хвильового руху, обумовлюючи суто контактний механізм зношування маси спокою.

В роботах [9, 10] дещо переоцінювалась роль внутрішньої енергії металізованого водню в механізмах контактної динаміки. Подальший аналіз виявив провідну роль контактної перетворення саме енергії спокою в енергію хвильового руху. При цьому за внутрішньою енергією металізованого водню залишається роль активатора такого більш потужного процесу.

Найефективніше таке перетворення здійснюється в контактних розривах, де в нерівноважних умовах зміщується енергія спокою, кінетична, внутрішня та гравітаційна енергія. Народжені тут кооперативні хвилі, поширюючись всією системою, підсилюються за рахунок «всіпання» енергії спокою та внутрішньої енергії (згадані вже «інсипативні» хвилі) або ж поступово згасають, збільшуючи внутрішню енергію (дисипативні хвилі). Якщо в результаті одного-двох (в катастрофічних випадках) або ж багатьох проходів через контактний розрив переважатимуть «інсипативні» хвилі, то відбуватиметься різке, або поступове зменшення енергії спокою і гравітаційної маси космічного об'єкту з виходом хвильової енергії в систему більшого масштабу шляхом оберненого енергетичного каскаду [9, 10]. Крім оберненого механізму контактної динаміки забезпечує також прямиї енергетичний каскад, в ході якого може долатись і значно перевищуватись світловий бар'єр – табу релятивізму.

Коротко перерахуємо тут різноманітні вияви такого роду процесів: катастрофічні вибухи нових та наднових зір, потужне випромінювання об'єктів з активними ядрами, радіоґалактик, барстерів, пульсарів, перемінних зір, джерел гамма-сплесків, струмені (джети), а також поступове заміщення кеплерових форм руху хвильовими в планетарних, зоряних, галактичних системах.

Наявність двох типів хвиль («інсипативних» та дисипативних) у динамічному кооперативі певного рівня організації обумовлює циклічні коливання внутрішньої енергії (та відповідно температури), формуючи у т.ч. клімат. Стосовно Землі це розглядається нижче більш детально.

Контактні розриви в надрах Землі та походження Місяця

Шарувата структура Землі добре відома. Акцентуємо тут увагу на внутрішньому розриві твердого ядра Землі, відкритому нещодавно [16] – рис. 4. Саме цей розрив, на наш погляд, обумовлює не тільки генерацію основної «дипольної» компоненти геомагнітного поля [9, 10], але й первинну хвильову геодинаміку, яка в подальшому трансформується в хвильову плюм- та плейт-тектоніку, вулканізм, сейсмічність та циклічні зміни клімату. Більше того, раптове виникнення цього розриву внаслідок релаксації напружень в первинному кристалічному ядрі Землі на ранніх етапах еволюції планети, власне, й обумовило хвильове винесення на орбіту речовини нашого супутника – Місяця. Ця речовина складалась переважно з матеріалу розм'якшеної в той час мантиї Землі з домішками рідкого залізного ядра. Такий механізм не потребує теоретичних підгонок щодо виникнення Місяця внаслідок мегаімпаکتу та заміщує собою вкрай реальну ідею термоядерного воднево-гелієвого джерела енергії в надрах Землі [17]. Неважко підрахувати, що для винесення таким чином Місяця на навколосемну орбіту необхідне виникнення контактної перетворення посередині твердого ядра Землі товщиною всього близько міліметра. Виникнення аналогічних розривів всередині твердих ядер планет-гігантів Сонячної системи пояснює як велику кількість супутників цих планет, так і відомий надлишок теплової емісії їх надр. Хорошим активатором такого роду процесів є металізований водень, який з одного боку в суто трибологічному аспекті сприяє охрупченню та розтріскуванню кристалічного заліза і його сплавів, а з іншого – активно виділяє внутрішню енергію на

етапах релаксації контактного тиску [9, 10].

Наведемо деякі числові оцінки потужності геоконтактного динамо на внутрішньому розриві твердого ядра Землі, виходячи з даних [3] щодо віддалення Місяця від Землі щорічно в середньому на 4 см впродовж 1972–2001 рр. Ці дані не мають адекватного пояснення з застосуванням звичного для багатьох законів збереження моменту імпульсу системи Земля–Місяць та відповідного сповільнення обертання Землі [5] по тій простій причині, що за 1972–2001 рр. період обертання Землі (за винятком місячних, річних та квазідвадцятилітніх варіацій) в цілому не збільшився, а зменшився на 3 мс [18, 19, 34].

Приймаючи започаткований в роботах [4, 5] підхід до розрахунку відносного зменшення гравітаційної маси центру, рівного відносному збільшенню радіуса орбіти супутника, отримаємо середньорічну потужність втрати енергії спокою Землі:

$$-\frac{\Delta E_0}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{M_0 \cdot c^2}{\Delta t} \approx 1.7 \cdot 10^{24} \text{ \AA} \hat{\text{o}}, \quad (46)$$

де $E_0 = M_0 \cdot c^2$ – енергія спокою Землі, M_0 – маса спокою (гравітаційна маса), c – швидкість світла у вакуумі, L_0 – середня відстань між Землею та Місяцем, ΔL – збільшення цієї відстані за час Δt . Потужність (46) на 7 порядків величини перевищує сумарну потужність опромінення Землі Сонцем.

З іншого боку, в умовах контактного тиску всередині ядра $p \approx 3.5 \cdot 10^{11}$ Па, при радіусі внутрішнього розриву $R \approx 0.1R_3 \approx 6.4 \cdot 10^5$ м [16] та умовному коефіцієнті контактного тертя в розриві $f \sim 1$ суто трибологічно оцінимо швидкість v розривного зміщення в контакт з умови енергетичного балансу:

$$v = -\frac{\Delta E_0}{\Delta t \cdot f \cdot p \cdot 4\pi R^2} \approx 1 \text{ м/с} \quad (47)$$

При середній довжині доріжки контакту, рівній πR , отримаємо період контактного циклу близько місяця, що безпосередньо пов’язує динаміку контактного розриву в твердому ядрі Землі з приливною гравітаційною взаємодією в системі Земля–Місяць.

Аналогічні розрахунки, проведені для внутрішньоядерного розриву Сонця [9, 10], частково синхронізованого з обертанням Юпітера, приводять до значень умовного коефіцієнта тертя на рівні $f \sim 10^{-5} - 10^{-6}$, що свідчить про квазів’язкий характер сонячного контакту в умовах високих температур зони термоядерного синтезу. Такий механізм забезпечує дещо меншу ефективність контактної трансформації енергії спокою Сонця: $\sim 10^{-12} E_0$ щорічно проти $\sim 10^{-10} E_0$ щорічно для Землі. Цей механізм одночасно обумовлює як відоме систематичне збільшення астрономічної одиниці довжини (на ≈ 15 см щорічно, що вже традиційно списується на рахунок сповільнення обертання Сонця [5]), так і наявний дефіцит сонячних нейтрино, який не менш традиційно відноситься на рахунок т.з. нейтринних осциляцій [9, 10]. Насправді ж геліоконтактне динамо в якості побічного ефекту забезпечує половину [9, 10] енергії випромінювання Сонця за рахунок дисипації енергії кооперативних хвиль.

Спеціально слід зауважити, що загальне збільшення потенційної енергії супутників та їх кінетичної енергії, а також розігрів–охолодження надр грають в енергетичному балансі контактного динамо вторинну роль. Лівова частка контактної-утилізованої енергії спокою як Землі, так і Сонця шляхом оберненого енергетичного каскаду передається в системи вищих рангів –Галактику, місцеве скупчення галактик, Метагалактику, вносячи таким чином свою роль в загальний тренд сучасної еволюції цих систем – контактну трансформацію енергії спокою наявної матерії в енергію хвильових (гідродинамічних, гравітаційних, електромагнітних) форм руху. Цей тренд відповідає спіралі трієстого часу, яка розкручується в цілому. Вочевидь, на попередньому етапі утворення матерії з крупномасштабного поля [9, 10] ця спіраль закручувалась. В такій еволюційній космологічній схемі, звісно, нема місця Великому вибуху – фантому сучасної фізики.

«Вільна» прецесія Землі та земного ядра, рух полюсів.

В’язкість зовнішнього ядра та генерація геомагнітного поля

Відмінність Ейлерового значення періоду вільної прецесії (за інерцією) осі Землі (305 діб) від експериментально встановленого чандлерівського періоду в $\approx 410 - 435$ діб викликає жваву дискусію та не має адекватного пояснення. Насправді ж, в динамічному кооперативі Земля–Місяць, що входить до космічних кооперативів вищих рангів, нема місця вільним рухам, розрахованим лише за законами теоретичної механіки твердого тіла, або ж механіки деформівного твердого тіла, чи гідромеханіки. Твердження про «вільне затухання» такого роду прецесій (нутацій) врешті призводять до грубих помилок в оцінці базових параметрів Землі, зокрема в оцінках в’язкості зовнішнього ядра Землі [20]. Вказана вище відмінність періодів та рух полюсів Землі забезпечуються впливом кооперативних хвиль суцільного спектру, лише частково синхронізованих з дискретними частотами вільної прецесії Землі в цілому, або її ядра. Існуючі оцінки динамічної в’язкості рідкого ядра Землі, що базуються на аналізі згасання «вільних» трансляційних коливань внутрішнього твердого ядра, або затухання «вільної» нутації зовнішнього ядра [20],

різко (на 4–13 порядків величини) завищують значення динамічної в'язкості рідкого ядра Землі і знаходяться у прямій конфронтації з незалежними оцінками [21] на рівні $\eta \approx (1-1.5) \cdot 10^{-2}$ Па·с. Фактично автори роботи [20] видають за молекулярну кінематичну в'язкість рідкого ядра кооперативну в'язкість системи, яка, власне, і регулює всі рухи в динамічному кооперативі.

Зауважимо, однак, що вказана вище низька динамічна молекулярна в'язкість рідкого ядра Землі зовсім не свідчить на користь гідромагнітного динамо в питаннях генерації магнітного поля Землі. Загальний спектр просторових варіацій геомагнітного поля, як уже відзначалось [9, 10], містить типовий провал в середній частині, характерний саме для системи кооперативних хвиль. Між тим висновок автора роботи [22] про існування в нижній мантії Землі струмових систем, що створюють дипольні магнітні поля, вельми далекий від нашої інтерпретації походження електромагнітного поля Землі [9, 10]: не за рахунок струмів провідності, а через поверхневий контактний ротор вектор-потенціалу (магнітна компонента поля \vec{B} в (35)), а також через контактний градієнт половинного квадрата вектор-потенціалу і частинну похідну \vec{V} за часом (електрична компонента поля \vec{E} в (34)). Така інтерпретація врешті й пояснює можливість виходу на поверхню Землі (і далі – в магнітосферу) відносно високочастотних компонент хвильового електромагнітного поля. Це недоступно для розуміння в рамках звичного для магнітної гідродинаміки ігнорування струмів зміщення в рівняннях Максвелла та заикнення на скін-ефектах.

Зауважимо також, що сама наявність рідкого ядра Землі та динаміка його обертання, розмірів, температури і густини обумовлюються не тільки (і не стільки) теплом фазових переходів та гравітаційної диференціації речовини [23, 24], як дисипацією енергії кооперативних хвиль в процесі утилізації енергії спокою Землі.

Циклічні зміни клімату Землі

На рис. 5 наведені середньотривалі коливання температури, вмісту вуглекислого газу та пилу в атмосфері Землі за даними аналізів антарктичних кернів [25]. Для порівняння на рис. 6 показані значно триваліші коливання вмісту вуглекислого газу в атмосфері [26]. Звертає на себе увагу практична синфазність коливань температури та вмісту вуглекислого газу в атмосфері, а також явна протифазність коливань температури та вмісту пилу в атмосфері. Різке збільшення вмісту пилу завжди передують глобальному потеплінню. Оскільки пил має, вочевидь, вулканічне походження, виникає запитання: що ж регулярно (з періодом близько 110–140 тис. років) пробуджує вулкани в надрах Землі, а через ≈ 10 тис. років по тому розтоплює глобальну кригу на планеті? Невже сонячне випромінювання, покладене сучасниками в основу кліматичних змін [1]? Аж ніяк. Наведемо деякі чисельні оцінки. Кооперативна в'язкість системи Земля–Місяць становить $V_{co} \approx (2-4) \cdot 10^5$ см²/с [9, 10]. Як свідчить аналіз параметрів внутрішніх хвиль в шельфових зонах світового океану [27, 28], кооперативна в'язкість системи цих хвиль вельми близька до вище наведеної величини. Отже, гідросфера Землі прямо інтегрована в динамічний кооператив системи Земля–Місяць. З іншого боку, аналіз параметрів хвильових кооперативних структур в атмосфері Землі (торнадо та шквалів у нижній тропосфері, циклонів, депресій, антициклонів у верхній тропосфері) приводить до значень кооперативної в'язкості нижньої тропосфери $V_{co} \sim 1 \cdot 10^8$ см²/с, верхньої тропосфери – $V_{co} \sim 1 \cdot 10^{11}$ см²/с. Для порівняння: кооперативна в'язкість магнітосфери Землі, за нашими оцінками, складає $\sim 10^{16}$ см²/с. Різниця у значеннях V_{co} тут пов'язана з наявністю додаткових джерел енергії – сонячного випромінювання (для тропосфери) та сонячного вітру (для магнітосфери Землі). З наведених даних та виразу (27) слідує, що середньотривалі цикли клімату (з періодом $\sim 100 \cdot 150$ тис. років) обумовлені глобальними кооперативними хвилями ($\lambda \approx 2\pi R_3$) в системі Земля–Місяць (включаючи гідросферу). В той же час, явно виражені квазітисячолітні цикли коливань температури, з якими пов'язані т.з. малі льодовикові періоди [29], обумовлені переважно кооперативними хвильовими процесами в нижній тропосфері. Короткотривалі коливання погоди (дні – тижні – перші місяці) пов'язані з хвильовою кооперацією у верхній тропосфері та тропосфері загалом. Окремий інтерес представляють змішані гідросферно-атмосферні хвильові явища типу Ель-Ніньйо-Ла-Нінья з основною періодичністю в декілька років. Вони фактично відображають контактну взаємотрансформацію двох динамічних кооперативів – гідросфери та тропосфери. В наведених вище прикладах контактними границями, де зароджуються кооперативні хвилі, слугують поверхня суші та океану, дно океанів, поверхні океанічних термоклинів та пікноклинів, атмосферні фронти, тропопауза.

На рис. 7 наведена динаміка середньої глобальної температури за останні півтора століття та сучасні уявлення про її тренд (пунктиром) на наступні півстоліття, що базуються на ілюзії: потепління pop stop [30]. Відповідний просторовий розподіл температурних «аномалій» показаний на рис. 8. Зробимо деякі зауваження щодо цього. Явно виражена географічна асиметрія таких аномалій свідчить про формування глобальної вихор-хвильової структури в нижній тропосфері, зміщеної в бік північного полюсу Землі внаслідок асиметрії розташування суші та наявності в південній півкулі холодної антарктичної циркумполярної течії. Ця структура включає топологічно подібні польові компоненти: гідродинамічну (аеродинамічну), гравітаційну та електромагнітну. Остання компонента обумовлювала прискорений дрейф

північного магнітного полюсу Землі впродовж останніх півстоліття [9, 10], який на сьогодні помилково відносять на рахунок формування струменевої структури в рідкому ядрі Землі [31]. Проходження пікової швидкості такого дрейфу у 2010–2011 рр. [9, 10], а також явно виражений спад глобальної температури в поточному 2018 р. свідчать про фактичне завершення пікової фази сучасного потепління та перспективу чергового льодовикового періоду. Питання залишається тільки в одному: яким буде цей період – малим (приблизно тисяча років) чи відносно великим (близько ста тисяч років – рис. 5)? У всіх випадках в короткотерміновій перспективі (найближче десятиліття) нас чекає деяка нормалізація клімату після посух останніх років, суттєве збільшення кількості опадів та відповідні зміни в сільськогосподарському виробництві (як в кращу, так і в гіршу сторону). Негативним ефектом похолодання (критичним для України вже взимку 2018/2019 рр.), вочевидь, стане необхідність різкого збільшення витрат на опалення в холодну пору року.

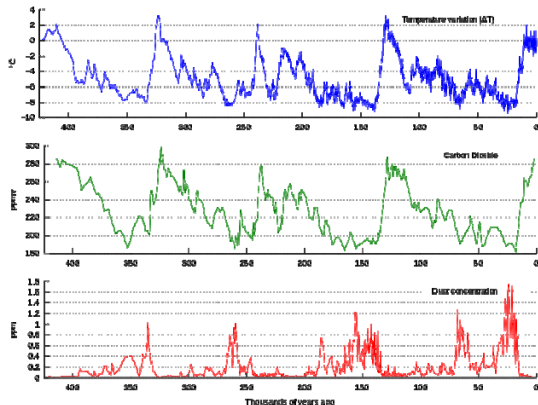


Рис. 5. Часові залежності температури, вмісту вуглекислого газу та пилу в атмосфері Землі за даними аналізів антарктичних кернів [25]

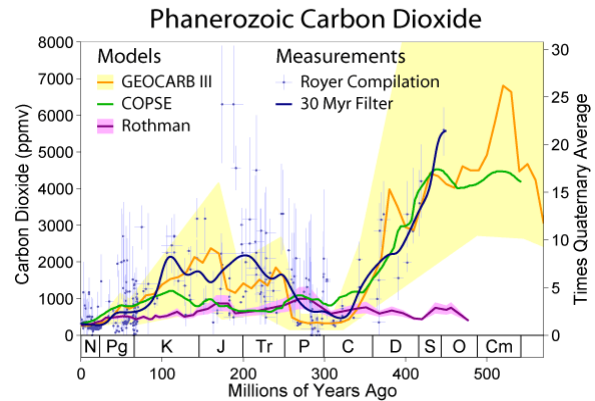


Рис. 6. Довготривалі коливання вмісту вуглекислого газу в атмосфері Землі [26]

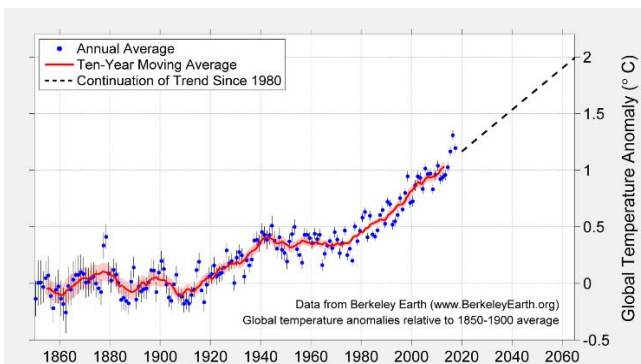


Рис. 7. Динаміка середньої глобальної температури за останні півтора століття [30]

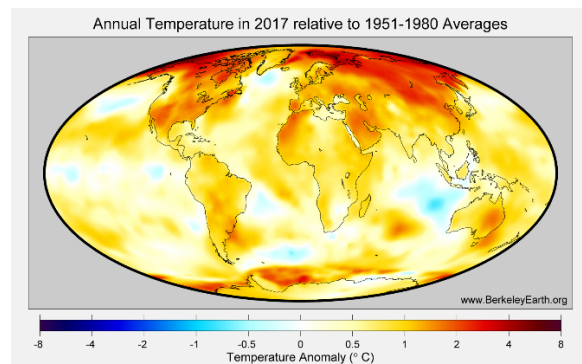


Рис. 8. Просторовий розподіл температурних аномалій Землі [30]

Відмітимо також, що домінуюча нині істерика [1] щодо антропогенних викидів вуглекислого газу в атмосферу Землі ніяк не в'яжеться з на порядок вищими концентраціями CO₂ в атмосфері в минулому – рис. 6. Загальне зменшення вмісту вуглекислого газу в атмосфері Землі з циклами ≈ 60 млн років та $\approx 220 - 250$ млн років (рис. 6) корелює з галактичними циклами [9, 10] та обумовлюється зменшенням постачання CO₂ з океану, який поступово охолоджується, як і Земля в цілому. Нинішні «аномальні» [1] запаси тепла в океані, накопичені у фазі глобального потепління, будуть ефективно утилізовані «інсипативними» хвилями динамічного кооперативу Земля–Місяць вже в ході наступаючого льодовикового періоду.

Хвильова геодинаміка, плюм- та плейт-тектоніка, сейсміка та вулканізм

В роботі [6] наведені карта найбільш сейсмічно- та вулканічно-активних поясів планети, а також значення швидкостей міграцій тихоокеанських землетрусів як функції їх амплітуд. Автор роботи [6] відносить таку сейсмічну та вулканічну активність на рахунок геодинамічних хвиль, однак дотримується концепції збереження моменту імпульсу Землі, яка прямо протирічить механізму контактного динамо, що генерує такий момент у т.ч. в розломах літосфери та земної кори. Хвильове перенесення енергії в системі кооперативних хвиль йде як у бік великих часових та просторових масштабів, так і в бік малих масштабів. В останньому випадку групова швидкість хвиль може значно перевищувати зазначену в [6] межу швидкості поперечних сейсмічних хвиль.

Блокова структура земної кори та літосфери [6] виникла внаслідок впливу більш потужних внутрішніх хвильових рухів Землі, приливної взаємодії з Місяцем, а також безпосередньо внаслідок релаксації напружень. Згенеровані у різномасштабних контактних розломах вихор-хвильові кооперативні

структури сейсмічного, гравітаційного та електромагнітного поля обумовлюють широкий спектр неприливних варіацій гравітаційного поля Землі [7] та варіації результатів динамічних вимірювань сталої всесвітнього тяжіння [8], а також відмічені в роботі [32] сейсмомагнітосферні зв'язки.

Декларований в роботі [2] конвективний сценарій плюм- та плейт-тектоніки Землі не відповідає дійсності: мантіїні плюми мають суто хвильове походження, пов'язане з псевдопластичністю мантії – різкою залежністю її в'язкості від хвильових напружень зсуву. Це ілюструю рис. 3 (крива 2), де зображений процес накопичення та пришвидшеної релаксації напружень зсуву у псевдопластичній речовині. Форма часової розгортки такого роду повністю відповідає графіку вулканічної активності Землі, породженої супутнім розігрівом надр – рис. 5 (часова залежність вмісту вулканічного пилу в атмосфері). Навпаки, форма варіацій температури та викидів CO₂ (з океану) в атмосферу Землі на рис. 5 відповідає нестационарній динаміці напружень стиску – рис. 3 (крива 1).

Контактні розриви псевдопластичної мантії генерують як недипольні компоненти геомагнітного поля, так і глибоко ешелоновані температурні поля, обумовлюють наявність астеносфери та можливість хвильового переміщення літосферних плит. При цьому океанічний спрединг переважає субдукцію плит, адже внаслідок оберненого енергетичного каскаду в системі кооперативних хвиль тіло Землі розширюється, що цілком узгоджується з позицією автора роботи [33] та різко дисонує з домінуючою нині концепцією конвективної геодинаміки [2].

Контактне динамо регулює не тільки температуру земних надр, але й частоту обертання Землі. При цьому орбітальний резонанс нашого супутника (внаслідок якого Місяць повернутий до Землі однією стороною) зовсім не свідчить про згасання внутрішньої динаміки Місяця, як нерідко вважають. Прикладом тут є динамічний кооператив Галілеєвих супутників Юпітера (Іо, Європи, Ганімеда та Калісто), які всі повернуті до Юпітера однією стороною. Однак, бурхлива вулканічна діяльність на Іо підтверджує дію кооперативного динамо-процесу. Доволі висока частота обертання Юпітера та решти газових гігантів безпосередньо підтримується потужними механізмами контактного динамо в надрах цих планет. Їх рекордні розміри та вельми мала густина прямо підтверджують протікання оберненого енергетичного каскаду в системі кооперативних хвиль – особливо для Сатурна з густиною, вдвічі меншою за середню густина решти гігантів.

Повертаючись на Землю, варто зауважити також щільну сітку поверхневих розривів земної кори, яка визначає лініаменти рельєфу, спрямовує підземні води та формує мікроклімат, в якому ми живемо.

Явно виражений спад потужності геоконтактного динамо за останній мільярд і особливо за останні десятки мільйонів років (рис. 6) в контексті ситуації на Венері ставить питання про перспективи життя на Землі загалом. Відповідь на нього філософська: нема нічого вічного в матеріальному світі, тут все розвивається за спіраллю.

Література

1. МГИЭК. Изменение климата, 2013. Физическая научная основа – Резюме для политиков – Наблюдаемые изменения климатической системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_ru.pdf
2. Кузьмин М. Глубинная геодинамика – основной механизм развития Земли / М. Кузьмин, В. Ярмолюк, В. Кравчинский // Наука в России. – 2013. – № 6. – С. 10–19.
3. Chapront T. A new determination of lunar orbital parameters, precession constant and tidal acceleration from LLR measurements / T. Chapront, M. Chapront-Touze, G. Francou // Astronomy and Astrophysics. – 2002. – V. 387. – P. 700–709.
4. Krasinsky G.A. Secular Increase of Astronomical Unit from Analysis of the Major Planet Motions and its Interpretation / G.A. Krasinsky, V.A. Brumberg // Celestial Mech. And Dynamical Astronomy. – 2004. – V. 90. – P. 267–288.
5. Miura T. Secular increase of the Astronomical Unit: a possible explanation in terms of the total angular momentum conservation law. URL: [arXiv:0905.3008v3\[astro-ph.EP\]](https://arxiv.org/abs/0905.3008v3)17Nov2009.
6. Викулин А.В. О геодинамическом детекторе гравитационных волн / А.В. Викулин // Пространство и время. – 2014. – № 1 (15). – С. 196–207.
7. Антонов Ю.В. Связь неприливных вариаций вертикального градиента силы тяжести с сейсмической активностью земных недр / Ю.В. Антонов, Л.И. Надежка, И.Н. Софронич, К.С. Черников // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2004. – № 2. – С. 158–161.
8. Измайлов В.П. Исследование вариаций результатов измерений гравитационной постоянной / В.П. Измайлов, О.В. Карагиоз, А.Г. Пархомов // Физическая мысль России. – 1999. – № 1/2. – С. 20–26.
9. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарного, сонячного і галактичного магнетизму. Частина I / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5 (229). – С. 106–118.
10. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор кооперативних космічних форм руху та механізм об'єднання електромагнітного, гравітаційного, сильного і слабого полів. Частина X. Порушена антисиметрія, нетривіальна топологія та недетермінована еволюція / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 2 (259). – С. 302–311.

11. Кантор И.Л. Гиперкомплексные числа / Кантор И.Л., Солодовников Ф.С. – М. : Наука, 1973. – 144 с.
12. Павлов Д.Г. Хронометрия трехмерного времени / Д.Г. Павлов // Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. – 2004. – № 1. – С. 20–32.
13. Вибрации в технике : справочник в 6 т. Т. 5. Измерения и испытания / под ред. М.Д. Генкина. – М. : Машиностроение, 1981. – 496 с.
14. Заспа Ю.П. Внутренний синтез движений и динамические характеристики внешнего трения / Ю.П. Заспа // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 3. – С. 233–247.
15. Заспа Ю.П. Автоволновое трение и неравновесная динамическая саморегуляция трибосистемы / Ю.П. Заспа // Трение и износ. – 2012. – Т. 33, № 5. – С. 537–549.
16. 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.
17. Терез Э.И. К вопросу о происхождении Луны и плюм-, плейттектонической эволюции геосфер (оболочек) Земли / Э.И. Терез, М.Е. Герасимов // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31, № 6. – С. 153–163.
18. Гришаев А.А. Периодическое движение полюсов Земли: реальность или иллюзия? [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://newfiz.narod.ru>
19. Сидоренков Н.С. Методика подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb41/sidoren.pdf>
20. Смайли Д.Е. Прямые наблюдения вязкости внешнего ядра Земли и экстраполяция измерений вязкости жидкого железа / Д.Е. Смайли, В.В. Бражкин, А. Палмер // УФН. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 91–105.
21. Минеев В.Н. Об измерении вязкости расплавов металлов при высоких давлениях и расчетах вязкости применительно к ядру Земли / В.Н. Минеев, А.И. Фунтиков // УФН. – 2004. – Т. 174, № 7. – С. 727–742.
22. Ладынин А.В. Дипольные источники главного геомагнитного поля / А.В. Ладынин // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 4. – С. 634–649.
23. Song X. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core / X. Song, P.G. Richards // Nature. – 1996. – V. 382. – P. 221–224.
24. Richards P.G. Earth's inner core – discoveries and conjectures / P.G. Richards // Astronomy and Geophysics. – 2000. – V. 41, № 1. – P. 1.20–1.24.
25. Ледниковый период [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/Ледниковый_период.
26. Углекислый газ в атмосфере Земли [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/Углекислый_газ_в_атмосфере_Земли
27. Бондур В.Г. Внутренние волны на материковом и островном шельфах открытого океана: сравнительный анализ на примере наблюдений на Нью-Йоркском и Гавайском шельфах / В.Г. Бондур, Ю.В. Гребенюк, К.Д. Сабинин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46, № 5. – С. 694–702.
28. Ярошук И.О. Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря / И.О. Ярошук, А.П. Леонтьев, А.В. Кошелева // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 1 (15). – С. 37–44.
29. Средневековый климатический оптимум [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Средневековый_климатический_оптимум
30. Global temperature anomalies. URL: www.BerkeleyEarth.org
31. Livermore P.W. An accelerating high-latitude jet in Earth's core / P.W. Livermore, R. Hollerbach, C.C. Finlay // Nature Geoscience. – 2017. – V. 10. – P. 62–68.
32. Гальпер А.М. Радиационный пояс Земли [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.astronet.ru/db/msg/1171214>
33. Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли / Кузнецов В.В. – Камчатка : ИКИР, 2008. – 360 с.
34. Куимов К.В. Вращение Земли и продолжительность суток [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.astronet.ru/db/msg/1225962>

References

1. MGIEK. Izmenenie klimata, 2013. Fizicheskaya nauchnaya osnova – Rezyume dlya politikov – Nablyudaemye izmeneniya klimaticheskoy sistemy [Elektronnyy resurs]. – Режим доступа : http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_ru.pdf
2. Kuzmin M. Glubinnaya geodinamika – osnovnoy mehanizm razvitiya Zemli / M. Kuzmin, V. YArmolyuk, V. Kravchinskiy // Nauka v Rossii. – 2013. – № 6. – S. 10–19.
3. Chapront T. A new determination of lunar orbital parameters, precession constant and tidal acceleration from LLR measurements / T. Chapront, M. Chapront-Touze, G. Francou // Astronomy and Astrophysics. – 2002. – V. 387. – P. 700–709.
4. Krasinsky G.A. Secular Increase of Astronomical Unit from Analysis of the Major Planet Motions and its Interpretation / G.A. Krasinsky, V.A. Brumberg // Celestial Mech. And Dynamical Astronomy. – 2004. – V. 90. – P. 267–288.
5. Miura T. Secular increase of the Astronomical Unit: a possible explanation in terms of the total angular momentum conservation law. URL: [arXiv:0905.3008v3\[astro-ph.EP\]](https://arxiv.org/abs/0905.3008v3)17Nov2009.
6. Vikulin A.V. O geodinamicheskom detektore gravitatsionnykh voln / A.V. Vikulin // Prostranstvo i vremya. – 2014. – № 1 (15). – S. 196–207.
7. Antonov YU.V. Svyaz neprilivnykh variatsiy vertikalnogo gradianta silyi tyajesti s seysmicheskoy aktivnostyu zemnykh nedr / YU.V. Antonov, L.I. Nadejka, I.N. Sofronich, K.S. Chernikov // Vestnik Voronejskogo un-ta. Geologiya. – 2004. – № 2. – S. 158–161.
8. Izmaylov V.P. Issledovanie variatsiy rezultatov izmereniy gravitatsionnoy postoyannoy / V.P. Izmaylov, O.V. Karagioz, A.G. Parhomov // Fizicheskaya mysl Rossii. – 1999. – № 1/2. – S. 20–26.

9. Zaspа YU.P. Kontaktne dinamо yak generator kogerentnih kosmichnih form ruhu ta dжерело planetarnого, sonyachного і galaktichного magnetizmu. *СНастіна I / YU.P. Zaspа // Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2015. – № 5 (229). – S. 106–118.
10. Zaspа YU.P. Kontaktne dinamо yak generator kooperativnih kosmichnih form ruhu ta mehanizm ob'ednannya elektromagnitного, gravitatsynого, silного і slabkого poliv. *СНастіна H. Porushena antisimetriya, netrivialna topologiya ta nedeterminovana evolyutsiya / YU.P. Zaspа // Herald of Khmelnytskyi National University*. – 2018. – № 2 (259). – S. 302–311.
11. Kantor I.L. *Giperkompleksnyie chisla / Kantor I.L., Solodovnikov F.S.* – M. : Nauka, 1973. – 144 s.
12. Pavlov D.G. Hronometriya trehmemного vremeni / D.G. Pavlov // *Giperkompleksnyie chisla v geometrii i fizike*. – 2004. – № 1. – S. 20–32.
13. *Vibratsii v tehnikе : spravochnik v 6 t. T. 5. Izmereniya i ispytaniya / pod red. M.D. Genkina*. – M. : Mashinostroenie, 1981. – 496 s.
14. Zaspа YU.P. Vnutrenniy sintez dvijeniy i dinamicheskie harakteristiki vneshnego treniya / YU.P. Zaspа // *Trenie i iznos*. – 2011. – T. 32, № 3. – S. 233–247.
15. Zaspа YU.P. Avtovolnovoe trenie i neravnovesnaya dinamicheskaya samoregulyatsiya tribosistemy / YU.P. Zaspа // *Trenie i iznos*. – 2012. – T. 33, № 5. – S. 537–549.
16. 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.
17. Terez E.I. K voprosu o proishojdenii Lunyi i plyum-, pleyttektonicheskoy evolyutsii geosfer (obolochek) Zemli / E.I. Terez, M.E. Gerasimov // *Geofizicheskij jurnal*. – 2009. – T. 31, № 6. – S. 153–163.
18. Grishaev A.A. Periodicheskoe dvijenie polyusov Zemli: realnost ili illyuziya? [Elektronnyy resurs]. – Rejim dostupa : <http://newfiz.narod.ru>
19. Sidorenkov N.S. Metodika podgotovki daniyh ob osobennostyah tsirkulyatsii atmosfery dlya monitoringa klimata [Elektronnyy resurs]. – Rejim dostupa : <http://method.meteor.ru/publ/sb/sb41/sidoren.pdf>
20. Smayli D.E. Pryamnye nablyudeniya vyazkosti vneshnego yadra Zemli i ekstrapolyatsiya izmereniy vyazkosti jidkogo jeleza / D.E. Smayli, V.V. Brajkin, A. Palmer // *UFN*. – 2009. – T. 179, № 1. – S. 91–105.
21. Mineev V.N. Ob izmerenii vyazkosti rasplavov metallov pri vyisokih davleniyah i raschetah vyazkosti primenitelno k yadru Zemli / V.N. Mineev, A.I. Funtikov // *UFN*. – 2004. – T. 174, № 7. – S. 727–742.
22. Ladyinin A.V. Dipolnyie istochniki glavnogo geomagnitного polya / A.V. Ladyinin // *Geologiya i geofizika*. – 2014. – T. 55, № 4. – S. 634–649.
23. Song X. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core / X. Song, P.G. Richards // *Nature*. – 1996. – V. 382. – P. 221–224.
24. Richards P.G. Earth's inner core – discoveries and conjectures / P.G. Richards // *Astronomy and Geophysics*. – 2000. – V. 41, № 1. – P. 1.20–1.24.
25. Lednikovyy period [Elektronnyy resurs]. – Rejim dostupa : http://ru.wikipedia.org/wiki/Lednikovyy_period.
26. Uglekislyiy gaz v atmosfere Zemli [Elektronnyy resurs]. – Rejim dostupa : http://ru.wikipedia.org/wiki/Uglekislyiy_gaz_v_atmosfere_Zemli
27. Bondur V.G. Vnutrennie volny na materikovom i ostrovnom shelfah otkryitogo okeana: sravnitelnyiy analiz na primere nablyudeniya na Nyu-Yorkskom i Gavayskom shelfah / V.G. Bondur, YU.V. Grebenyuk, K.D. Sabinin // *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. – 2010. – T. 46, № 5. – S. 694–702.
28. YAruschuk I.O. Eksperimentalnyie issledovaniya vnutrennih voln v pribrejnoy zone YApronskogo morya / I.O. YAruschuk, A.P. Leontev, A.V. Kosheleva // *Podvodnyie issledovaniya i robototekhnika*. – 2013. – № 1 (15). – S. 37–44.
29. Srednevekovyiy klimaticheskiy optimum [Elektronnyy resurs]. – Rejim dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/Srednevekovyiy_klimaticheskiy_optimum
30. Global temperature anomalies. URL: www.BerkeleyEarth.org
31. Livermore P.W. An accelerating high-latitude jet in Earth's core / P.W. Livermore, R. Hollerbach, C.C. Finlay // *Nature Geoscience*. – 2017. – V. 10. – P. 62–68.
32. Galper A.M. Radiatsionnyiy poyas Zemli [Elektronnyy resurs]. – Rejim dostupa : <http://www.astronet.ru/db/msg/1171214>
33. Kuznetsov V.V. Vvedenie v fiziku goryachey Zemli / Kuznetsov V.V. – Kamchatka : IKIR, 2008. – 360 s.
34. Kuimov K.V. Vraschenie Zemli i prodoljitelnost sutok [Elektronnyy resurs]. – Rejim dostupa : <http://www.astronet.ru/db/msg/1225962>

zaspа_yuriy@ukr.net

Рецензія/Peer review : 23.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Горошко А.В.

МЕХАНІЧНИЙ ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ МАШИНИ УДАРНОЇ ДІЇ ДЛЯ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОГО ЗМІЦНЕННЯ

В статті розглянуті питання розробки конструкції та методики розрахунку основних параметрів генератора механічних імпульсів машин ударної дії для статико-імпульсної зміцнювальної обробки. Проведено огляд останніх досліджень і публікацій в області синтезу та конструювання генераторів механічних імпульсів машин ударної дії та виявлено їх конструктивні відмінності. Запропоновано конструкцію кулачкового генератора механічних імпульсів пристрою для зміцнення зовнішніх неповних сферичних поверхонь статико-імпульсної дії зі статичним навантаженням бойка та інструмента. Розроблено математичні моделі роботи генератора для періоду взведення та розгону бойка. Встановлено діапазон оптимальних значення колової швидкості ротора. Проведено комп'ютерне моделювання роботи генератора з використанням системи для проведення кінематичного та динамічного аналізу технічних систем SOLIDWORKS Motion.

Ключові слова: пластичне деформування, генератор, метод, енергія, параметр, імпульс.

M.M. KOSIYUK, S.A. KOSTYUK
Khmelnytsky National University

MECHANICAL PULSE GENERATOR MACHINES FOR IMPACT STATIC PULSE STRENGTHENING

The article deals with the development of the design and methodology for calculating the basic parameters of the mechanical impulse generator of impact machines for static-impulse hardening processing. A review of recent research and publications was carried out in the purview of synthesis and construction of mechanical impulse generators of impact machines and their constructive differences were revealed. The construction of a cam generator of mechanical impulses of a bipolar action of the device for strengthening of external incomplete spherical surfaces of static-impulse action with static load of a paint and a tool is proposed. The use of a mechanical impulse generator of such a design allows to increase the use of impact energy, the processing efficiency and reduce energy costs. The study of the working cycle of the boyc movement was conducted. The diagram of displacements of the boycott is obtained, depending on the angle of rotation of the cam, which illustrates the working process of the cam shock mechanism. The mathematical models of the operation of the generator for the period of boosting and acceleration have been developed. To confirm the adequacy of the proposed mathematical models, a computer simulation of the generator operation using a system for conducting kinematic and dynamic analysis of technical systems SOLIDWORKS Motion. A range of optimal values of rotor speed is established. The limits of optimal values of the phase angle of advance are determined depending on the rotor speed and the structural features of the impact mechanism. Graphs of the dependence of rotor rotation frequency on the magnitude of the phase angle of advance are obtained.

Keywords: plastic deformation, generator, method, energy, parameter, impulse.

Постановка проблеми

В наш час для підвищення довговічності та несучої здатності деталей машин широкого застосування набули методи обробки поверхнево-пластичним деформуванням (ППД). Гарно себе зарекомендував комбінований метод статико-імпульсної обробки (СІО), який поєднує статичне та динамічне навантаження зміцнюваної поверхні. Важливою відмінністю СІО є те, що в ударній системі бойок-інструмент генеруються плоскі акустичні хвилі деформації, що формують в зоні контакту інструмента із зміцнювальною поверхнею ударні імпульси, форма яких залежить від параметрів ударної системи і впливає на ККД процесу зміцнення [1].

Для забезпечення ударних навантажень використовуються різноманітні за параметрами, конструкціями, виду живлення машини та пристрої ударної дії [2–4]. Привертають увагу до себе генератори механічних імпульсів (ГМІ) машин ударної дії, які характеризуються малою енергоємністю, простотою конструкції і малими габаритами (з'являється можливість встановлення на металообробні верстати). Зменшення габаритів та металоємкості досягається за рахунок функціонального об'єднання ланок механізму та внесення ГМІ у корпус машини ударної дії [3].

Тому питання розробки нових малогабаритних конструкцій ГМІ для машин ударної дії, які не потребують громіздких станцій живлення (гідравлічних, пневматичних) є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

При зміцненні динамічними методами ППД застосовують машини ударної дії, які використовують для своєї роботи пневматичну, гідравлічну, електричну, механічну енергію [5–7] і мають подібні за принципом дії ударні механізми (рис.1). До складу таких механізмів входить ударний елемент (бойок) у різних конструктивних виконаннях, який здійснює зворотно-поступальні рухи в напрямних і наносить серію ударів по інструменту з певною частотою та енергією.



Рис. 1. Схема ударного механізму з електричним приводом:
1 – кривошип; 2 – гільза; 3 – поршень; 4 – бойок; 5 – патрон; 6 – інструмент

При СІО застосовуються машини ударної дії з статичним навантаженням на інструмент (рис. 2), вектор дії якого збігається з напрямком дії ударного імпульсу, чим забезпечується стабільність процесу зміцнення та зменшення втрат енергії удару.

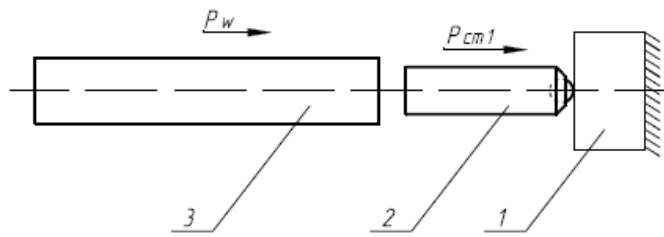


Рис. 2. Конструктивна схема ударної системи з статичним навантаженням інструмента:
1 – деталь; 2 – інструмент; 3 – бойок

Враховуючи особливості СІО ударні пристрої повинні забезпечувати: максимальну передачу необхідної кількості енергії удару в зону деформації за допомогою ударної системи (бойок-інструмент), геометричні параметри якої дозволяють генерувати хвилі деформації [1]; нерозривний контакт ударної системи після удару (деталь-інструмент-бойок) для максимального використання енергії удару; необхідну частоту імпульсів (ударів); низьку металоємність, що дозволить встановлювати ударний пристрій на металооброблювальні верстати (токарні, фрезерні і т.д.); високий ККД, що сприяє зниженню енергоємності процесу обробки.

Пристрої для деформаційного зміцнення деталей машин бувають з винесеним (ГМІ) та вбудованим у його виконавчу ланку. Для деформаційного зміцнення поверхонь деталей машин порівняно не великих розмірів з погляду мінімізації габаритів пристрою перевагу надають використанню пристроїв з вбудованими ГМІ. Величина енергії удару при деформуванні є основним фактором для вибору та конструювання пристрою і його силових (виконавчих) ланок.

Аналіз конструкцій ударних пристроїв показав, що перераховані вимоги будуть залежати від застосування того чи іншого типу ГМІ (магнітострикційні, електромагнітні, механічні, пневматичні, гідравлічні) [2–7].

Магнітострикційні забезпечують малу енергію та високі частоти ($10^9 \dots 10^{12}$ Гц) і застосовуються для ультразвукової обробки ППД. Електромагнітні мають більшу динамічну енергію, переважно використовуються при карбуванні. Механічні володіють не високою енергією і частотою удару та відрізняються простотою конструкції. Пневматичні працюють за рахунок стисненого повітря, характеризуються низьким ККД (8...20%) і переважно використовуються там де необхідно забезпечити високу енергію удару (25...80 Дж). Гідравлічні забезпечують високу енергію удару (50...10000 Дж), мають вищий ККД, плавність регулювання, але складні у виготовленні і потребують потужних станцій живлення.

При розробці машин ударної дії однією з головних задач є підвищення продуктивності та ефективності використання енергії, що надходить від ГМІ в зону деформації. Для розв'язання даної задачі в роботі [8] запропоновано удосконалену модель ударної системи ГМІ з статичним навантаженням ступінчатого бойка та інструмента.

Мета статі – розробка конструкції та методики розрахунку основних параметрів генератора механічних імпульсів машин ударної дії для статико-імпульсної обробки.

Виклад основного матеріалу

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано конструкцію генератора механічних імпульсів пристрою для зміцнення НСП статико-імпульсної дії з статичним навантаженням бойка $F_{ст1}$ та інструмента $F_{ст2}$. В основі запропонованого генератора (рис. 3) використовується кулачковий ударний механізм здатний здійснювати серію ударів за один оберт кулачка та нова модель ударної системи [8].

Генератор містить кулачок 1 з інструментальною головкою з статично навантаженими інструментами 2 (виконаними з можливістю переміщення у напрямку перпендикулярному до осі обертання кулачка 1) та ударні механізми, прикріплені на корпусі ГМІ (не показано).

Розрахунок енергосилових та конструктивних параметрів ударної системи проведено згідно з методикою розглянутою в [8].

Взведення підпружинених бойків 3 здійснюється кулачком 1, який обертається з частотою n_i та має з ними кінематичний зв'язок. Під час робочого ходу бойка маси m відбувається перетворення потенціальної енергії стисненої пружини в кінетичну енергію бойка, який розганяється до передударної швидкості v . В момент удару бойка відбувається передача механічної енергії статично навантаженому інструменту 2, які в подальшому набувають спільної швидкості $v_{ш}$, чим забезпечується статико-імпульсне деформаційне навантаження на оброблювану поверхню заготовки 4.

ГМІ запропонованої конструкції дозволяє забезпечити підвищення використання енергії удару, продуктивності процесу обробки та скоротити енерговитрати.

Головною перевагою кулачкових механізмів є можливість задавання руху вихідної ланки (бойка) по заданому закону при відносній простоті конструкції механізму та високій точності його роботи. Такі

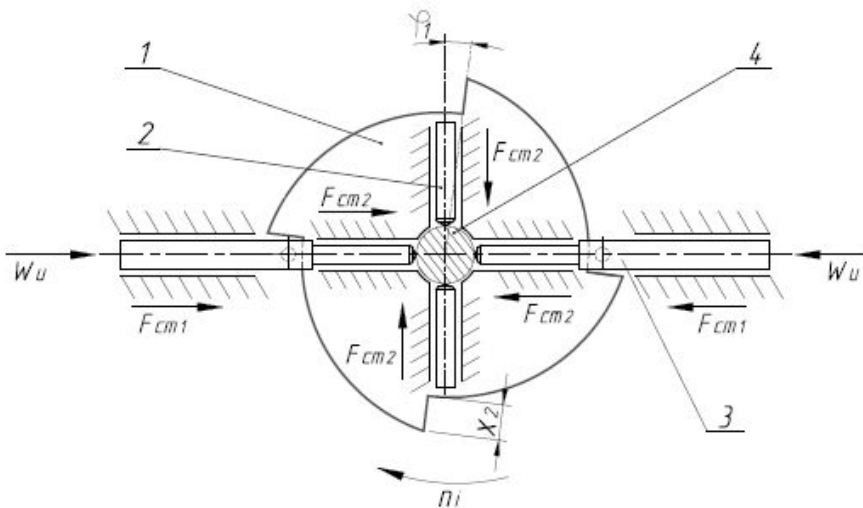


Рис. 3 Схема генератора механічних імпульсів біполярної дії:
1 – кулачок; 2 – інструмент; 3 – бойок; 4 – заготовка

механізми надійні в роботі, займають мало місця в конструкціях машин та найчастіше знаходять застосування там де потрібно забезпечити автоматизм та жорстку кінематику руху ланок механізму.

Відповідно до запропонованої конструкції ведучою ланкою є кулачок, а виконавчим органом (вихідною ланкою) бойок (штовхач) з центральним розташуванням (роликів наконечником).

Переміщення бойка залежно від кута повороту кулачка описується

залежністю:

$$x_2 = \varphi_x(\varphi), \tag{1}$$

де x_2 – прямолінійне переміщення бойка при повороті кулачка на кут φ .

В період віддалення бойок в напрямних рухається прямолінійно під дією кулачка, а під час наближення розганяється до передударної швидкості за рахунок потенціальної енергії стисненої пружини. В період ближнього стояння відбувається удар бойка по інструменту з наступним вистоєм. На рис. 4 наведено схему фазових кутів кулачка.

Робочий цикл руху бойка $T_{Ц}$ можна розділити на декілька етапів, (рис.5):

1) Холостий хід $t_{х.х} = x_2$ відповідає куту віддалення кулачка (бойок рухається у крайнє положення (зведення бойка) за час $t_{зв}$;

2) Вистій бойка у зведеному стані – відповідає куту дальнього стояння кулачка $t_{д.с}$;

3) Робочий хід $t_{р.х}$, відповідає моменту, коли бойок з прискоренням розганяється до перед ударної швидкості (розгін бойка) t_p ;

4) Удар бойка по інструменту та їх спільний рух, з подальшим пружно-пластичним деформуванням матеріалу зразка інструментом t_y ;

5) Вистій (після удару) бойка в контактi з інструментом під дією статичного навантаження – відповідає куту ближнього стояння кулачка (удар – вистій) $t_{б.с}$.

Таким чином робочий цикл бойка можна записати:

$$T_{Ц} = t_{зв} + t_{д.с} + t_p + t_y + t_{б.с} \tag{2}$$

Повний цикл руху бойка (взведення, вистій, розгін, удар, вистій) відбудеться за час:

$$T_{Ц} = 1/f, \tag{3}$$

де f – частота ударів, яка розраховується за формулою:

$$f = n/z, \tag{4}$$

де n – частота обертання ротора; z – кількість кулачків

Робочий процес кулачкового ударного механізму ілюструється діаграмою переміщень бойка в залежності від кута повороту кулачка представленою на (рис. 6).

При розробці математичної моделі та дослідженні робочого циклу були прийняті наступні припущення, які ідеалізують реальні умови роботи ударного механізму: втрати на механічне тертя не чинять суттєвого впливу на енергетичні характеристики пристрою; маси рухомих елементів вважаються зосередженими; тривалість співударяння бойка з хвостовиком інструмента була дуже малою порівняно з періодом циклу і в розрахунках не враховувалась; механізм у роботі розглядається в період усталеного руху (робота рушійних сил не враховувалась).

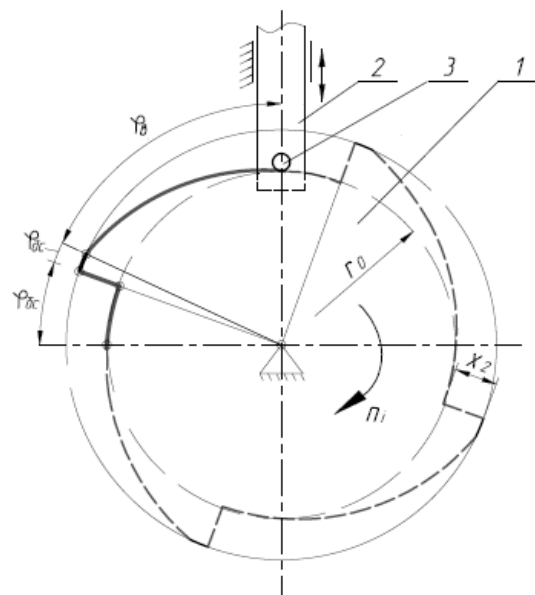


Рис. 4. Фазові кути кулачка:
1 – кулачок; 2 – бойок; 3 – ролик; $\varphi_{в}$ – кут віддалення;
 $\varphi_{дс}$ – кут дальнього стояння; $\varphi_{бс}$ – кут ближнього стояння

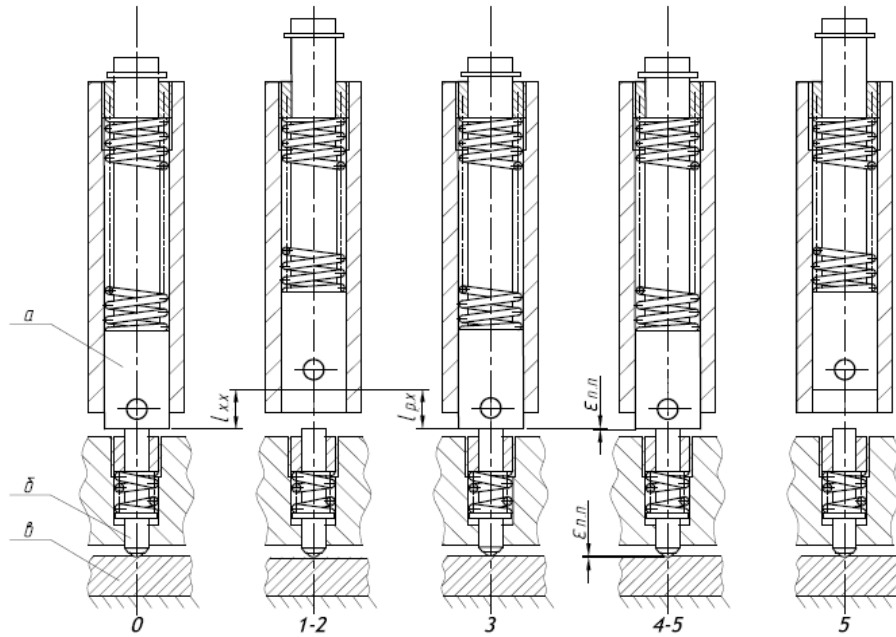


Рис. 5. Цикл роботи бойка: а – бойок; б – інструмент; в – зразок

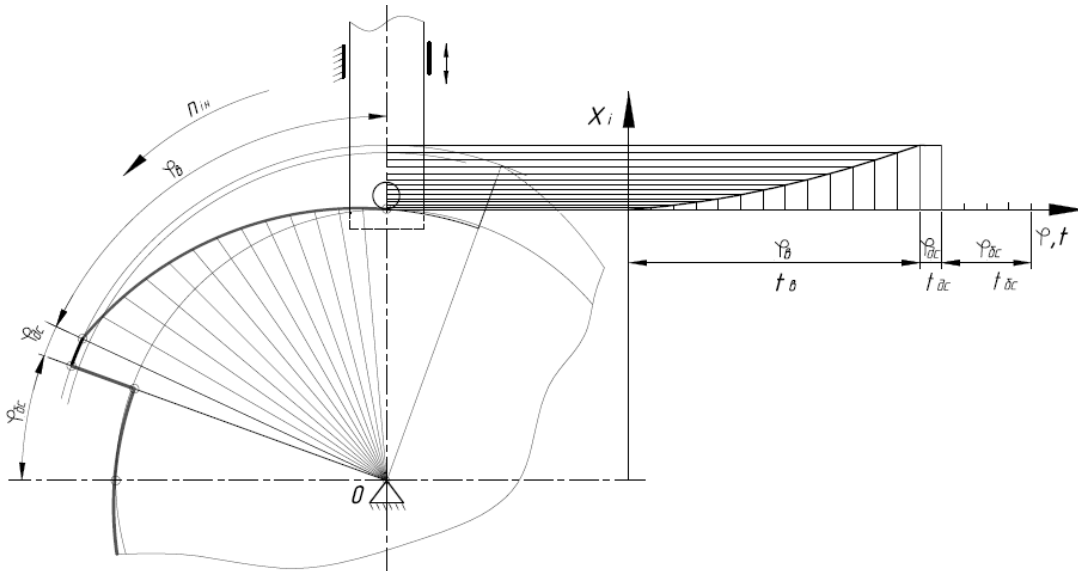


Рис. 6. Діаграма переміщень руху бойка

Головним показником який визначає ККД у запропонованому ГМІ є енергія удару, оскільки частота ударів залежить від конструкції кулачка та частоти його обертання.

Для забезпечення максимальної передачі енергії необхідно враховувати рекомендації, щодо проектування елементів ударної системи [11].

Головними конструктивними параметрами, що визначають розміри ГМІ є геометричні характеристики елементів ударної системи та робочий хід бойка $l_{p,x}$. Робочий хід розраховується в залежності від енергії удару та величини передударної швидкості і задається параметрами кулачка.

Необхідні значення енергії та передударної швидкості бойка забезпечуються за рахунок дії пружних сил стисненої пружини жорсткістю k .

При роботі регулювання енергії ударів здійснюється завдяки додатковому стисненню пружини регулювальною втулкою на величину x_1 .

Розглядаючи механізм на першому етапі роботи як змінну систему, взведення бойка (штовхача) можна виразити через роботу, яка витрачається на переміщення бойка в опорах і стиснення пружини [9]:

$$\Sigma A = A_f + A_{\text{п.о.}} \tag{5}$$

де A_f – робота сил тертя; $A_{\text{п.о.}}$ – корисна робота виконана машиною для взведення бойка.

З іншого боку взведення бойка здійснюється за рахунок повертання кулачка на деякий кут $\varphi_{\text{в}}$.

Враховуючи, що роботу зведених рушійних сил і сил опору можна виразити через зведений момент: $M_{\text{зв}} = M_p + M_{\text{к.о.}}$, рівняння рівноваги буде мати вигляд:

$$dA = M_{\text{зв}} \cdot d\varphi \tag{6}$$

де φ – узагальнена координата кута повороту ланки взведення.

Корисна робота виконана машиною для введення бойка (стиснення пружини) визначається як різниця потенціальної енергії в початковій і кінцевій точках (рис.7):

$$A_{к.о} = W_{п2} - W_{п1} = \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} = \frac{k}{2}((x_1 + x_2)^2 - x_1^2), \quad (7)$$

де $W_{п1}, W_{п2}$ – потенціальна енергія пружини в початковій та кінцевій точках; k – жорсткість пружини; x_1 – величина стиску пружини регулювальною втулкою; x_2 – величина стиску пружини внаслідок повороту кулачка.

Модуль роботи сил тертя в напрямних бойка залежно від кута підйому кулачка ϑ (рис. 8) визначається як:

$$A_f = |F| \sin \vartheta f X_2, \quad (8)$$

де F – необхідна сила для стиснення пружини на величину X_2 , ϑ – кут підйому кулачка, f – коефіцієнт тертя.

В нашому випадку сила F в залежності від величини X_2 визначається як:

$$F = \frac{k(x_1 + x_2)^2}{x_2} \quad (9)$$

Враховуючи формули (7-9), формула (6) матиме наступний вигляд:

$$dA = d\left(\frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} + k(x_1 + x_2)^2 \sin \vartheta f\right) = M_{\text{вв}} d\varphi \quad (10)$$

Або:

$$M_{\text{вв}} = \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} + k(x_1 + x_2)^2 \sin \vartheta f \right) \quad (11)$$

Отримана математична модель роботи ГМІ на першому етапі робочого циклу (11) дозволяє визначити необхідний зведений крутний момент на валу ротора для найбільш навантаженого періоду (взведення бойка).

Якщо зробити припущення, що система консервативна (дисипативні чинники не враховуємо), то період розгону бойка (третій етап) можна описати згідно з законом збереження енергії наступним чином:

$$\frac{m_1 v_1^2(t_1)}{2} + \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2(t_2)}{2} + \frac{kx_1^2}{2}, \quad (12)$$

де t_1, t_2 – проміжки часу; m_1 – маса бойка; v_0 – швидкість бойка в початковий момент часу t_1 ; v_1 – швидкість бойка в момент часу t_2 (удар по інструменту).

Враховуючи, що початкова швидкість бойка $v_0 = 0$, а передударна $v_1 = \frac{dx_2}{dt}$, рівняння руху бойка після математичних перетворень матиме вигляд:

$$\frac{dx_2}{dt} = \left(\frac{k}{m} (x_2^2 + 2x_1x_2) \right)^{1/2} \quad (13)$$

З отриманих рівнянь видно, що динаміка бойка під час розгону в більшості залежить від конструктивних параметрів ГМІ. Швидкість бойка буде зростати по мірі випрямлення пружини і досягне максимальних значень в момент удару по інструменту.

Максимальне переміщення бойка визначається як:

$$X_2 = R_{\text{max}} - r_0, \quad (14)$$

де R_{max}, r_0 – максимальний та мінімальний радіуси кулачка.

Для визначення часу розгону бойка $t_{\text{роз}}$ запишемо наступне рівняння:

$$dt = \frac{dx_2}{\left(\frac{k}{m} (x_2^2 + 2x_1x_2) \right)^{1/2}} \quad (15)$$

Для забезпечення збіжності торців в момент удару необхідно узгодити прямолінійний рух бойка та обертний рух кулачка, тобто від початку розгону бойка до удару за час $t_{\text{роз}}$, кулачок повинен повернутись на кут φ_i (див. рис. 4):

$$\varphi_i \leq 90 - (\varphi_{\text{с}} + \varphi_{\text{дс}} + \varphi_{\text{н}}), \quad (16)$$

Для визначення кутової швидкості повороту кулачка можна скористатись наступною умовою:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (17)$$

Враховуючи, що $t_{\text{роз}} = t_{\text{пов}}$, формула (17) з врахуванням (15) матиме вигляд:

$$\omega_{\text{max}} = \frac{d\varphi_i \left(\frac{k}{m} (x_2^2 + 2x_1x_2) \right)^{1/2}}{dx} \quad (18)$$

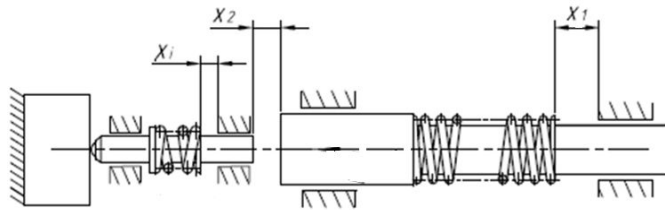


Рис. 7. Розрахунково-конструктивна схема ударної системи з додатковим навантаженням бойка

Отримані математичні моделі для періодів взведення та розгону бойка дозволяють визначити основні параметри ГМІ ударної машини.

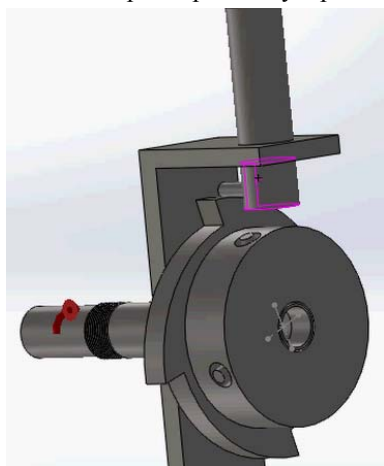


Рис. 8. Імітаційна модель ГМІ

Для визначення параметрів ГМІ проводились розрахунки відповідно до запропонованої методики в середовищі Excel.

Встановлено, що підвищення частоти обертання ротора до $n_{кр}$, коли час повороту кулачка $t_{пов}$ на кут $\varphi_{ст}$ стає меншим за час відведений на розгін і удар бойка $t_{роз}$, призводить до перехоплювання бойка кулачком і унеможливує процес передачі енергії бойка інструменту.

Для перевірки працездатності запропонованої моделі ГМІ та дослідження оптимального частотного ряду обертів привода ротора, а також фазового кута випередження φ_1 розроблено комп'ютерну імітаційну модель ГМІ (рис. 8) та проведено моделювання у середовищі SOLIDWORKS з використанням системи для проведення кінематичного та динамічного аналізу технічних систем SOLIDWORKS Motion.

В результаті проведених досліджень отримано графічні залежності частоти обертання ротора $n_{кр}$ від фазового кута випередження φ_1 , які представлені на рис.9 та підтверджено адекватність математичної моделі, так як відхилення результатів не перевищують 6%.

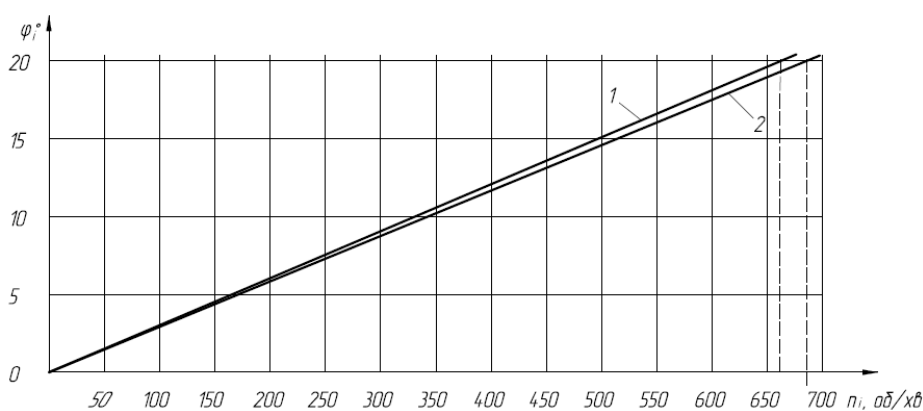


Рис. 9. Графічна залежність частоти обертання ротора від кута випередження φ_1
1 – теоретична крива; 2 – крива отримана за допомогою комп'ютерного моделювання

Аналіз результатів показав, що частотний ряд обертання ротора знаходиться в межах 12,5...650 об/хв., так як після $n_{кр} = 660$ відбувається перехоплювання бойка.

Під час призначення режимів обробки слід наближатись до діапазону максимально-допустимих значень частоти обертання ротора так як від неї залежить продуктивність обробки. Відповідно до запропонованої методики проведено розрахунки параметрів ГМІ машини ударної дії, основні технічні характеристики якого зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ГМІ

Радіус деформуючого тіла R_i , мм	1.5...2.5
Енергія удару W , Дж	0.5...4
Статичне навантаження інструмента $P_{ст1}$, Н	40...80
Статичне навантаження бойка $P_{ст2}$, Н	60...200
Частота ударів f , Гц	1.3...84
Частота обертання ротора n , хв. ⁻¹	10...630
Стиснення пружини регулювальною втулкою X_1 , мм	0...27
Стиснення пружини кулачком X_2 , мм	15
Маса бойка m_1 , кг	0.3
Жорсткість пружини k , Н·м	50000

Висновки

Розглянуто способи зміцнення поверхневого шару деталей машин методами ППД.

Запропоновано модель ГМІ машини ударної дії з статичним навантаженням бойка та інструмента за схемою обробки біполярним ударом. Розроблено методику розрахунку параметрів ГМІ та отримано математичні моделі для характерних періодів його роботи. Проведено комп'ютерне моделювання роботи ГМІ та визначено діапазон частот обертання ротора.

Результати проведеної роботи плануються використати при проектуванні та виготовленні

технологічного спорядження біполярної дії для статико-імпульсного зміцнення зовнішніх неповних сферичних поверхонь пальців кульових шарнірів.

Література

1. Киричек А. В. закономерности волнового деформационного нагружения очага деформации / А. В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – №2 (41). – С. 144–147.
2. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами / Браславский В.М. – М. : Машиностроение, 1975. – 160 с.
3. Горбунов В.Ф. Ручные пневматические молотки / В.Ф. Горбунов, В.И. Бабуров, Г.С. Жартовский и др. – М. : Машиностроение, 1967. – 182 с.
4. Ряшенцев Н.П. Динамика электромагнитных импульсных систем / Н.П. Ряшенцев, Ю.З. Ковлев. – Новосибирск : Наука, 1974. – 182 с.
5. Волков С.А. Строительные машины / С.А. Волков, С.А. Евтюков. – СПб : ДНК, 2008. – 704 с.
6. Кусницын Г.И. Пневматические ручные машины. Справочник / Г.И. Кусницын. и др. – Л. : Машиностроение, 1968. – 376 с.
7. Селивра С.А. Разработка гидравлических механизмов ударного действия различной мощности / С.А. Селивра, Т.А. Устименко, А.Ф. Яценко // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Горно-электромеханическая». – 2009.– Вып. 17 (157). – С. 235.
8. Костюк С.А. Підвищення ефективності використання енергії удару при статико-імпульсному зміцненні поверхневим пластичним деформуванням / С.А. Костюк, М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 4. – С. 48–56.
9. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин / Кіницький Я.Т. – Київ : Наукова думка, 2002. – 660 с.

References

1. Kyrychek A. V. Zakonomernosti volnovoho deformatsyonnoho nahruzhennya ochaha deformatsyy / A. V. Kyrychek, D.L. Solovov, S.A. Sylantev // Herald Rybinskoi gosudarstvennoi avyatsyonnoi tekhnolohycheskoi akademyy im. P.A. Soloveva 2017. No. 2, pp. 144–147.
2. Braslavskiy V.M. Tehnologiya obkatki krupnykh detaley rolikami. M.: Mashinostroenie, 1975. 160 p.
3. Gorbunov V.F. Ruchnyie pnevmaticheskie molotki / V.F. Gorbunov, V.I. Baburov, G.S. Jartovskiy. M., Mashinostroenie, 1967. 182 p.
4. Ryashentsev N.P. Dinamika elektromagnitnykh impulsnykh system / N.P. Ryashentsev, YU.Z. Kovlev Novosibirsk, Nauka, 1974. 182 p.
5. Volkov S.A. Stroitelnyie mashiny / S.A. Volkov, S.A. Evtukov. – SPb. : DNK. – 2008. – 704 p.
6. Kusnitsyin G.I. Pnevmaticheskie ruchnyie mashiny. Spravochnik / G.I. Kusnitsyin. – L.: Mashinostroenie, 1968. – 376 p.
7. Selivra S.A. Razrabotka gidravlicheskih mehanizmov udarnogo deystviya razlichnoy moschnosti / S.A. Selivra, T.A. Ustimenko, A.F. YAtsenko // Nauchnyie trudyi Donetskogo natsionalnogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Gorno-elektromehaniicheskaya». – 2009.– Issue 17, 235 p.
8. Kostyuk S.A. Pidvischennya efektyvnosti vikoristannya energiyi udaru pri statiko-impulsnomu zmitsnenni poverhnevim plastichnim deformuvannyam / S.A. Kostyuk, M.M. Kosiyuk // Herald of Khmelnytskyi national University. – 2018. – No. 4, pp. 48–56.
9. Kinitskiy YA.T. Teoriya mehanizmiv i mashin. Kyiv: Naukova dumka, 2002. 660 p.

Рецензія/Peer review : 10.9.2018 р.

Надрукована/Printed :26.9.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф., Кіницький Я.Т.

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 № 1 від 30.08.2018 р.

Підп. до друку 30.09.2018 р. Ум.друк.арк. 46,55 Обл.-вид.арк. 44,29

Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.

Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету” редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63