ISSN 2307-5732

Науковий журнал

5.2017

ВІСНИК

Хмельницького національного університету

Технічні науки
Technical sciences

Scientific Journal

Herald of Khmelnytskyi National University

2017, Issue 5, Volume 253

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, 2017, № 5 (253)

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

Включено до наукометричних 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

Члени редколегії

Технічні науки

Березненко М.П., д.т.н., Бойко Ю.М., д.т.н. Бубулис Алгимантас, д.т.н. (Литва), Гордєєв А.І., 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., Карван С.А., д.т.н., Карташов В.М., д.т.н., Кичак В.М., д.т.н., Кіницький Я.Т., д.т.н., Коновал В.П., 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., Поморова О.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., Сарібеков Г.С., д.т.н., Семенко А.І., д.т.н., Сілін Р.І., д.т.н., Славінська А.Л., д.т.н., Сорокатий 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.

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

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету, протокол № 3 від 28.09.2017 р.

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

☎ (038-2) 62-51-08 **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, 2017
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2017

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

В.В. ЧАБАН, Є.О. КОРОБЧЕНКО
МАТЕМАТИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ З ОЦІНКИ ВПЛИВУ
ПАРАМЕТРІВ КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ КО-2 НА
ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ТОВАРОПРИЙОМНОГО МЕХАНІЗМУ ПРИ ПУСКУ 7

В.Г. ЗДОРЕНКО, Н.М. ЗАЩЕПКІНА
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕХАНІЗМУ ВІДТЯГНЕННЯ
ПОЛОТНА КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ 11

С.О. КОШЕЛЬ, Г.В. КОШЕЛЬ
АНАЛІЗ ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ ВИЩИХ КЛАСІВ З ШАТУНОМ,
ЩО МАЄ ВИГЛЯД СКЛАДНОЇ ЛАНКИ 16

В.Г. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕНКО, П.В. МАТВІЇШИН
ВПЛИВ ВОДНЮ НА ВТОМНУ ВИТРИВАЛІСТЬ СТАЛЕЙ
ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ 20

І.І. СИДОРЕНКО, В.О. КУРГАН
СИНТЕЗ ЦІЛЬОВОЇ ПРУЖНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БАЗІ ПРУЖНОЇ
МУФТИ З НЕЛІНІЙНИМ МЕХАНІЧНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ 26

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА, О.Ю. ДЕЙНЕКА
НАПРУЖЕНА ПОСАДКА ЗАМКНЕНОГО ПРУЖНОГО СТРИЖНЯ
В КРИВОЛІНІЙНИЙ ОТВІР НЕСКІНЧЕННОЇ ІЗОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ 32

А.О. РАМСЬКИЙ
ПОВЕДІНКА В НУЛІ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ДЛЯ ПЛИТИ,
ПОКРИТОЇ ШАРОМ ІЗ ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ 39

В.М. НЕДІЛЬКО, В.М. СТРАТОНОВ
ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕС ПРОВЕДЕННЯ
ЕВАКУАЦІЇ З ПРИВОДНЕНОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА 42

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

А.Л. СЛАВІНСЬКА
МЕТОДОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАТИВНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ОДЯГУ 47

О.М. ДОМБРОВСЬКА, В.В. МИЦА
ДОСЛІДЖЕННЯ БАЗОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ОДЯГУ ДЛЯ ХЛОПЧИКІВ
ТА ДІВЧАТОК ДОШКІЛЬНОЇ ВІКОВОЇ ГРУПИ 54

Л.В. ПЕЛИК, Ю.А. ПЕЛЕХ
ОСОБЛИВОСТІ ПІДБОРУ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ
ЗАХИСТУ ОРГАНІВ ДИХАННЯ 58

О.В. КОНДРАТЮК, Е.Є. КАСЬЯН
ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ
ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ ШКІР 62

А.Ю. СЄРІКОВА, А.В. НІКОНОВА, О.А. АНДРЕЄВА
ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ І ТОКСИЧНОСТІ РОЗЧИНІВ ДЛЯ ОБРОБКИ
ШКІРЯНОГО НАПІВФАБРИКАТУ ПЕРЕД ДУБЛЕННЯМ 67

Т.В. ІВАНІШЕНА, М.В. ХРУЩ
ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗПЕЧНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ 71

А.Н. КУНИК, Д.Г. САРИБЕКОВА, Р.С. СЕРВЕТНИК, Г.С. САРИБЕКОВ
ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ
С МАКРОМОЛЕКУЛОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ 77

О.М. КВАРТЕНКО, Л.А. САБЛІЙ, І.Б. ГРЮК
ВИЛУЧЕННЯ ФЕНОЛІВ ІЗ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПІДЗЕМНИХ
ВОД МЕТОДОМ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ 83

Л.А. САБЛІЙ, М.С. КОРЕНЧУК, С.В. КОНОНЦЕВ, Ю.Р. ГРОХОВСЬКА
РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ ІНТЕГРОВАНОЇ МУЛЬТИТРОФІЧНОЇ
АКВАКУЛЬТУРИ У РИБНИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ ІЗ
ЗАМКНУТИМ ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ 89

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

О.В. БАРМАК, О.В. МАЗУРЕЦЬ, В.І. КЛІМЕНКО
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ФОРМУВАННЯ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ 93

Ю.О. СЄРОВ, С.С. ФЕДУШКО, Р.О. ГОЛОЩУК
СИСТЕМА ВЕРИФІКАЦІЇ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ ВЕБ-УЧАСНИКІВ 104

Р.О. БАГРІЙ
СИСТЕМА ВВЕДЕННЯ ТЕКСТУ ЗА ДОПОМОГОЮ
НЕОДНОЗНАЧНОЇ ВІРТУАЛЬНОЇ КЛАВІАТУРИ 108

М.М. БИКОВ, В.В. КОВТУН, М.С. ФУРМАН
МЕТОД ПРЕДСТАВЛЕННЯ ОЗНАК У АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ
РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЦЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ 112

С.П. ГЛАВАЦКИЙ
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПАКЕТОВ В МАГИСТРАЛЬНОЙ
СЕТИ ПРОВАЙДЕРА 120

Н.М. ЯКИМЧУК
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ТА
РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 128

О.А. КРАВЧУК
ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ ПРОГРЕСИВНИХ ВЕБ-ДОДАТКІВ 132

В.О. ЗАРУЦЬКИЙ, О.С. ТОРОШАНКО
КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ПРИ ПЕРЕДАВАННІ ДАНИХ
У МЕРЕЖАХ РАДІОДАТЧИКІВ 137

В.В. МАРТИНЮК, Д.А. МАКАРИШКІН, Н.М. САМАРУК, Л.В. КАРПОВА
МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ НА
ОСНОВІ ТЕОРЕМИ МІТТАГ-ЛЕФФЛЕРА 145

Н.С. СВИРНЕВСКИЙ
АЛГОРИТМ ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ
ПОЛОЖЕНИЯ КАМЕРЫ ПО ОСОБЫМ ТОЧКАМ 158

М.В. СТАВНІЙЧУК, О.В. МАЗУРЕЦЬ, Т.К. СКРИПНИК
ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ РЕДАКТОР ЦИФРОВИХ КРЕСЛЕНЬ
ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ВАЛІВ У AUTODESK INVENTOR 165

О.Є. РУБАНЕНКО, М.О. ГРИЩУК, М.П. ЛАБЗУН
ОБҐРУНТУВАННЯ МЕЖ ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ АЧХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ВІДПОВІДНОГО ДЕФЕКТАМ ЗСУВУ ВИТКІВ 171

О.Р. ТРАЧ
КРИТИЧНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ ЗАВДАНЬ НАПРЯМІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВІРТУАЛЬНОЇ СПІЛЬНОТИ 177

І.З. МАНУЛЯК, С.І. МЕЛЬНИЧУК
РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОВЗНОГО ЗНАЧЕННЯ ОЦІНКИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕНТРОПІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ 182

Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ, К.В. ОГОРОДНИК, Н.А. СТОЯН
ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ НАФТОПРОДУКТІВ 187

С.М. ЗЛЕПКО, В.Е. КРИВОНОСОВ, С.В. ПАВЛОВ, А.Ю. АЗАРХОВ, Д.М. БАРАНОВСКИЙ
КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА КОМПЬЮТЕРНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОМОГРАФОВ ОТ НЕСТАБИЛЬНОСТИ И ПРОВАЛОВ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ 192

Л.О. ДУБЧАК, С.О. ВЕРБОВИЙ, О.М. БЕРЕЗЬКИЙ, Н.Я. САВКА, Т.В. ДАЦКО
НЕЧІТКА СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ПАТОЛОГІЧНИХ СТАНІВ МОЛОЧНОЇ ЗАЛОЗИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЦИТОЛОГІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ 203

Н.А. ОДЕГОВ
ОПЕРАТОРЫ ДИСПЕРСИИ И СОГЛАСОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ 211

В.Г. ЗДОРЕНКО, Н .М. ЗАЩЕПКІНА
ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ В’ЯЗАННЯ В’ЯЗАЛЬНИХ МАШИН ТА ШЛЯХИ ЇХ ЗНИЖЕННЯ 221

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Ю.П. ЗАСПА
КОНТАКТНЕ ДИНАМО ЯК ГЕНЕРАТОР КОГЕРЕНТНИХ (КООПЕРАТИВНИХ) КОСМІЧНИХ ФОРМ РУХУ ТА ДЖЕРЕЛО ПЛАНЕТАРНОЇ, СОНЯЧНОЇ, ГАЛАКТИЧНОЇ І МЕТАГАЛАКТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ. ЧАСТИНА VIII 226

Б.М. ЗЛОТЕНКО, Д.В. СТАЦЕНКО
ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ І ТЕМПЕРАТУРОЮ ПРИМІЩЕНЬ 240

С.В. КУЛИК, М.В. ЛЮТА, І.О. РОЗЛОМІЙ
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ QR-КОДУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ 244

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 677.055

В.В. ЧАБАН, Є.О. КОРОБЧЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

МАТЕМАТИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ З ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ КО-2 НА ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ТОВАРОПРИЙОМНОГО МЕХАНІЗМУ ПРИ ПУСКУ

Ефективність роботи круглов'язальних машин залежить від динамічних навантажень їх механізмів, зокрема товароприйомного механізму. На основі аналізу особливостей круглов'язальних машин встановлена доцільність використання методів математичного планування та проведення експериментальних досліджень впливу параметрів машини на динамічні навантаження, що виникають в товароприйомному механізмі під час пуску. Виявлено основні параметри круглов'язальної машини, що суттєво впливають на величину динамічних навантажень товароприйомного механізму. В результаті виконаних досліджень одержані рівняння регресії, що дозволяють оперативно знаходити величину динамічних навантажень товароприйомного механізму залежно від основних параметрів круглов'язальної машини. Результати досліджень можуть бути використані для розрахунку динамічних навантажень товароприйомного механізму та оцінки впливу параметрів круглов'язальної машини на їх величину.

Ключові слова: круглов'язальна машина, товароприйомний механізм, динамічні навантаження товароприйомного механізму, математичний експеримент, рівняння регресії.

V.V. CHABAN, E.A. KOROBCHENKO
Kyiv National University of Technologies and Design

MATHEMATICAL EXPERIMENT TO EVALUATE THE EFFECT OF THE PARAMETERS KO-2 CIRCULAR KNITTING MACHINES ON THE DYNAMIC LOADS AT START-UP MECHANISM OF ACCEPTANCE OF GOODS

The efficiency of the circular knitting machine depends on the dynamic loads of the mechanisms, in particular acceptance of goods *mechanism. Based on the characteristics of circular knitting machines analyze the expediency of the use of mathematical methods of planning and conducting experimental studies of the influence of the machine parameters on the dynamic loads arising* acceptance of goods *mechanism at start-up. The basic parameters of the circular machine that significantly affect the value of dynamic loads* acceptance of goods *mechanism. As a result of the research we obtained regression equations to quickly find the value of dynamic loads* acceptance of goods *mechanism depending on the basic parameters of the circular machine. The research results can be used to calculate the dynamic loads* acceptance of goods *mechanism and assess the impact of the circular machine settings to their size.*

Keywords: knitting machine, acceptance of goods *mechanism, dynamic loading* acceptance of goods *mechanism, mathematical experiment, the regression equation.*

Одним із найбільш суттєвих факторів, що впливають на ефективність роботи круглов'язальних машин, є динамічні навантаження, що виникають в товароприйомному механізмі в період несталих режимів роботи (пуск, зупинка, перемикання механізмів та ін.) [1–4]. Для розв'язання актуальної проблеми підвищення ефективності роботи круглов'язальних машин важливим є проведення досліджень впливу параметрів круглов'язальної машини на динамічні навантаження. Однак відсутність рекомендацій з вибору раціональних параметрів машини та режиму її роботи стримує розв'язання цієї задачі.

Об'єктом досліджень обрано математичний експеримент по оцінці впливу параметрів круглов'язальної машини КО-2 на динамічні навантаження товароприйомного механізму, що виникають в період пуску. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні математичні методи планування, аналізу та статистичної обробки результатів експерименту динамічних процесів в'язальних машин.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності роботи круглов'язальних машин шляхом зниження динамічних навантажень, стаття присвячена математичному експерименту по оцінці впливу параметрів круглов'язальної машини КО-2 на динамічні навантаження товароприйомного механізму при пуску.

Результати та їх обговорення. Аналіз досліджень [1–4] показує, що на ефективність в'язальних машин та автоматів (продуктивність та якість виробів) суттєво впливають динамічні навантаженні, що виникають в їх механізмах під час несталих режимів роботи. Метою математичного експерименту є виявлення основних факторів круглов'язальної машини КО-2, що впливають на динамічні навантаження товароприйомного механізму при пуску, та отримання рівнянь регресії, які дають можливість оперативно та достовірно оцінити ефективність впливу цих факторів на динамічні навантаження.

При проведенні математичного експерименту був вибраний рототабельний план другого порядку, як найбільш ефективний при вирішенні задач аналізу багатьох факторів на функцію цілі [5, 6].

В результаті аналізу особливостей конструкції круглов'язальної машини КО-2 в якості факторів, що суттєво впливають на динамічні навантаження товароприйомного механізму при пуску, прийняті:

X_1 – пусковий момент електродвигуна (тут і надалі мається на увазі приведені значення) (T_1);

X_2 – момент інерції ротора електродвигуна з урахуванням моменту інерції ведучого шківа

клинопасової передачі (J_1);

X_3 – жорсткість пружної в'язі, що з'єднує першу та другу обертальні маси привода (C_{12});

Вихідні параметри (функції цілі):

Y_1 – максимальне динамічне навантаження в пружній в'язі, що з'єднує електродвигун з механізмами машини (максимальне динамічне навантаження привода);

Y_2 – максимальне динамічне навантаження в пружній в'язі, що з'єднує привід з товароприйомним механізмом (максимальне динамічне навантаження товароприйомного механізму при пуску).

У відповідності з поставленою метою досліджень авторами вирішувалась трифакторна задача.

В якості "ядра" плану експерименту використана матриця повного факторного експерименту [6]. "Зоряні" точки будуємо на осях координат на відстані плеча $l = 1{,}682$. При цьому необхідна кількість дослідів становить: $N = 20$.

Кодування факторів здійснювалось по співвідношенню [6]:

$$X_i = \frac{C_i - C_{i0}}{\Delta C_i}, \tag{1}$$

де X_i – кодована величина фактору; C_i – натуральна величина фактору;

C_{i0} – натуральна величина фактору на нульовому рівні; ΔC_i – інтервал варіювання фактору.

Враховуючи технічну характеристику круглов'язальної машини КО-2 [2, 7], в якості нульових величин досліджуваних факторів приймаємо: $C_{10} = T_{10} = 48{,}6$ Нм; $C_{20} = J_{10} = 0{,}023$ кгм^2; $C_{30} = C_{120} = 1940$ Нм/рад.

В якості діапазону та інтервалів варіювання досліджуваних факторів, враховуючи конструктивні особливості круглов'язальних машин типу КО та перспективи їх удосконалення, приймаємо:

$$T_1 = (25{,}05...72{,}15)\,\text{Нм}; \qquad \Delta T_1 = 14\,\text{Нм};$$

$$J_1 = (0{,}005...0{,}041)\,\text{кгм}^2; \qquad \Delta J_1 = 0{,}0107\,\text{кгм}^2;$$

$$C_{12} = (258...3622)\,\text{Нм/рад}; \qquad \Delta C_{12} = 1000\,\text{Нм/рад}.$$

Таким чином зв'язок між кодованими та натуральними величинами факторів буде наступним:

$$X_1 = \frac{T_1 - 48{,}6}{14}; \quad X_2 = \frac{J_1 - 0{,}023}{0{,}0107} \quad X_3 = \frac{C_{12} - 1940}{1000} \tag{2}$$

Рівні та інтервали варіювання досліджуваних факторів наведено в табл. 1.

Використовуючи результати табл. 1 та рекомендації [6], побудована робоча матриця та матриця планування експерименту (табл. 2).

У відповідності з планом експерименту нами була проведена серія математичних експериментів, включаючи 20 дослідів – 20 варіантів розрахунків з використанням відомої методики [2], вихідних даних (параметри приведені до валу електродвигуна): $T_1 = 48{,}6$ Нм; $T_2 = 4{,}4$ Нм; $T_3 = 17{,}7$ Нм; $J_1 = 0{,}023$ кгм^2; $J_2 = 0{,}041$ кгм^2; $J_3 = 0{,}021$ кгм^2; $C_{12} = 1940$ Нм/рад; $C_{23} = 3062$ Нм/рад та табл. 2. Результати розрахунків наведені в табл. 3.

Рівняння регресії для визначення динамічних навантажень в механізмах круглов'язальної машини у відповідності з прийнятим планом експерименту може бути представлене у вигляді [6]:

$$\begin{aligned} Y = {} & B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + \\ & + B_{23}X_2X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2, \end{aligned} \tag{3}$$

де B_0 - вільний член рівняння регресії;

$B_1, B_2, B_3, B_{12}, B_{13}, B_{23}, B_{11}, B_{22}, B_{33}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання фактора
	-1,682	-1	0	1	1,682	
Пусковий момент електродвигуна T_1, Нм (X_1)	25,05	34,6	48,6	62,6	72,15	14
Момент інерції першої маси машини J_1 , кгм^2 (X_2)	0,005	0,123	0,023	0,0337	0,041	0,0107
Жорсткість пружної в'язі C_{12} , Нм/рад (X_3)	258	940	1940	2940	3622	1000

Використовуючи відповідну програму та вихідні дані (табл. 3), отримуємо необхідні величини коефіцієнтів рівняння регресії (3).

Таблиця 2

Робоча матриця та матриця планування експерименту

№ досліду	Робоча матриця (параметри)			Матриця планування		
	T_1, Нм	J_1, кгм^2	C_{12}, Нм/рад	X_1	X_2	X_3
1	62,6	0,0337	2940	+	+	+
2	62,6	0,0337	940	+	+	-
3	62,6	0,0123	2940	+	-	+
4	62,6	0,0123	940	+	-	-
5	34,6	0,0337	2940	-	+	+
6	34,6	0,0337	940	-	+	-
7	34,6	0,0123	2940	-	-	+
8	34,6	0,0123	940	-	-	-
9	25,05	0,0230	1940	-1,682	0	0
10	72,15	0,0230	1940	+1,682	0	0
11	48,6	0,0050	1940	0	-1,682	0
12	48,6	0,0410	1940	0	+1,682	0
13	48,6	0,0230	258	0	0	-1,682
14	48,6	0,0230	3622	0	0	+1,682
15	48,6	0,0230	1940	0	0	0
16	48,6	0,0230	1940	0	0	0
17	48,6	0,0230	1940	0	0	0
18	48,6	0,0230	1940	0	0	0
19	48,6	0,0230	1940	0	0	0
20	48,6	0,0230	1940	0	0	0

Таблиця 3

Результати математичного експерименту динамічних навантажень механізмів круглов'язальної машини КО-2

Номер досліду	Максимальне навантаження		Номер досліду	Максимальне навантаження	
	привода $T_{12max}(Y_1)$, Нм	товароприйомного механізму $T_{23max}(Y_2)$, Нм		привода $T_{12max}(Y_1)$, Нм	товароприйомного механізму $T_{23max}(Y_2)$, Нм
1	93,778	66,457	11	92,846	66,680
2	93,007	57,656	12	70,983	50,493
3	111,006	85,302	13	80,047	47,820
4	110,404	77,559	14	80,704	61,071
5	55,048	43,978	15	79,865	60,768
6	54,800	40,738	16	79,865	60,768
7	63,464	50,841	17	79,865	60,768
8	62,443	52,049	18	79,865	60,768
9	42,822	39,094	19	79,865	60,768
10	115,326	80,688	20	79,865	60,768

Для функції цілі Y_1:

$$B_0 = 79{,}88;\ B_1 = 21{,}55;\ B_2 = -6{,}40;\ B_3 = 0{,}27;\ B_{12} = -2{,}32;$$

$$B_{13} = 0{,}01;\ B_{23} = -0{,}08;\ B_{11} = -0{,}31;\ B_{22} = 0{,}69;\ B_{33} = 0{,}15.$$

Розрахунки підтвердили адекватність прийнятої моделі експерименту (розрахункове значення коефіцієнту Фішера $F_p = 2{,}879$ менше табличного $F = 5{,}01$).

Незначущими (довірча імовірність 0,95) є коефіцієнти: B_{13}, B_{23}.

Таким чином рівняння регресії для визначення максимального динамічного навантаження, що виникає при пуску круглов'язальної машини КО-2 в приводі, приймає вид:

$$Y_1 = 79{,}88 + 21{,}55X_1 - 6{,}4X_2 + 0{,}27X_3 - 2{,}32X_1X_2 - 0{,}31X_1^2 + 0{,}69X_2^2 + 0{,}15X_3^2\ . \quad (4)$$

Використовуючи залежності (2), виконаємо перехід у рівнянні (4) до натуральних значень факторів. Тоді остаточно одержимо:

$$T_{12max} = 2{,}049T_1 - 122{,}677J_1 - 15{,}487T_1J_1 - 3{,}12\cdot 10^{-4}C_{12} - \\ -1{,}58\cdot 10^{-3}T_1^2 + 6026{,}727J_1^2 + 1{,}5\cdot 10^{-7}C_{12}^2 + 1{,}01. \quad (5)$$

Для функції цілі Y_2 отримані наступні значення коефіцієнтів рівняння регресії:

$$B_0 = 60{,}79;\ B_1 = 12{,}39;\ B_2 = -6{,}16;\ B_3 = 2{,}99;\ B_{12} = -2{,}57;$$

$$B_{13} = 1{,}81;\ B_{23} = 0{,}69;\ B_{11} = 0{,}04;\ B_{22} = -0{,}42;\ B_{33} = -1{,}89.$$

Прийнята модель адекватна, так як умова $F_p < F$ виконується ($F_p = 2{,}879$; $F = 5{,}01$).

Розрахунки показали, що з ймовірністю 0,95 незначущими є коефіцієнти: B_{23}, B_{11}, B_{22}.

Тоді рівняння регресії (3) для функції цілі Y_2 (динамічного навантаження товароприйомного механізму при пуску) приймає вид:

$$Y_2 = 60{,}79 + 12{,}39X_1 - 6{,}16X_2 + 2{,}99X_3 - 2{,}57X_1X_2 + 1{,}81X_1X_3 - 1{,}89X_3^2 \ . \quad (6)$$

Використовуючи залежності (2), виконаємо перехід у рівнянні (6) до натуральних значень факторів:

$$\begin{aligned} T_{23max} &= 1{,}028T_1 + 258{,}091J_1 - 17{,}156T_1J_1 + 4{,}04\cdot 10^{-3}C_{12} + \\ &+ 1{,}293\cdot 10^{-4}T_1C_{12} - 1{,}89\cdot 10^{-6}C_{12}^2 + 11{,}119. \end{aligned} \quad (7)$$

Враховуючи нульові величини досліджуваних факторів: $T_{10} = 48{,}6$ Нм; $J_{10} = 0{,}023$ кгм^2; $C_{120} = 1940$ Нм/рад та використовуючи рівняння (5), (7), одержуємо залежності впливу параметрів круглов'язальної машини КО-2 на динамічні навантаження товароприйомного механізму при пуску:

$$\begin{aligned} T_{23max} &= f(T_1) = 0{,}885T_1 + 17{,}779\ ; \\ T_{23max} &= f(J_1) = 73{,}995 - 576{,}69J_1\ ; \\ T_{23max} &= f(C_{12}) = 1{,}032\cdot 10^{-2}C_{12} - 1{,}89\cdot 10^{-6}C_{12}^2 + 47{,}839\ . \end{aligned} \quad (8)$$

Висновки

В результаті виконаних досліджень встановлено, що:

- отримані результати підтверджують допустимість припущень, прийнятих при побудові даної математичної моделі та про можливість використання отриманих рівнянь регресії для визначення динамічних навантажень, що виникають в товароприйомному механізмі при пуску круглов'язальної машини типу КО;
- дослідження показали ефективність використання рівнянь регресії для аналізу впливу параметрів круглов'язальної машини на динамічні навантаження, що виникають в товароприйомному механізмі при пуску;
- отримані рівняння регресії відрізняються простотою та наочністю і не потребують великих затрат часу та спеціальної розрахункової техніки для вирішення завдань динамічного аналізу товароприйомного механізму в'язальних машин типу КО;
- результати досліджень можуть бути використані при проектуванні нових більш ефективних типів круглов'язальних машин.

Література

1. Хомяк О.Н. Повышение эффективности работы вязальных машин / Хомяк О.Н., Пипа Б.Ф. – М. : Легпромиздат, 1990. – 208 с.

2. Піпа Б. Ф. Динаміка круглов'язальних машин / Б.Ф. Піпа Б. Ф., О.М. Хомяк, Г.І. Павленко. – К. : КНУТД, 2005. – 294 с.

3. Хомяк О. М. Динаміка плосков'язальних машин та автоматів. – К. : КНУТД, 2008. – 250 с.

4. Чабан В. В. Динаміка основов'язальних машин / В.В. Чабан, Л.А. Бакан, Б.Ф. Піпа. – К. : КНУТД, 2012 – 287 с.

5. Виноградов Ю.С. Математическая статистика и ее применение к исследованиям в текстильной промышленности / Виноградов Ю.С. – М. : Легкая индустрия, 1964. – 319 с.

6. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента / Тихомиров В.Б. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 260 с.

7. Машины кругловязальные типа КО-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Черновцы, 1992. – 86 с.

References

1. Khomyak O.N. & Pipa B.F. (1990). Povyshenie effektivnosti raboty vyazal'nykh mashin [Increase the efficiency of knitting machines]. Moscow: Legprombytizdat

2. Pipa B.F., Khomiak O.M. & H.I. Pavlenko (2005). Dynamika kruhlov'iazalnykh mashyn [Dynamics of circular knitting machines]. Kiev: KNUTD.

3. Khomiak O. M. (2008). Dynamika ploskov'iazalnykh mashyn ta avtomativ [Dynamics of flat knitting machine]. Kiev: KNUTD.

4. Chaban V. V., Bakan L.A. & Pipa B.F. (2012) Dynamika osnovov'iazalnykh mashyn [The dynamics of warp-knitting machine]. Kiev: KNUTD.

5. Vinogradov Yu.S. (1964). Matematicheskaya statistika i ee primenenie k issledovaniyam v tekstil'noy promyshlennosti [Mathematical statistics and its application to research in the textile industry]. Moscow: Legkaya industriya.

6. Tikhomirov V.B. (1974). Planirovanie i analiz eksperimenta [Planning and analysis of the experiment]. Moscow: Legkaya industriya

7. Mashiny kruglovyazal'nye tipa KO-2. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii [Circular knitting machines of type KO-2. Technical description and user manual] (1992). Chernovtsy.

Рецензія/Peer review : 20.06.2017 р. Надрукована/Printed :30.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Місяць Володимир Петрович

УДК 677.055

В.Г. ЗДОРЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну
Н.М. ЗАЩЕПКІНА
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МЕХАНІЗМУ ВІДТЯГНЕННЯ ПОЛОТНА КРУГЛОВ'ЯЗАЛЬНОЇ МАШИНИ

Підвищення ефективності механізму відтягнення полотна круглов'язальної машини, зумовленої стабільністю зусилля відтягнення полотна, можна досягти використанням в його складі варіатора швидкості. Дослідження показують, що, виходячи із конструктивних особливостей механізмів відтягнення полотна, при цьому слід віддати перевагу лобовим двопоточним фрикційним варіаторам. В результаті виконаних досліджень розроблено нову конструкцію механізму відтягнення полотна круглов'язальної машини з двопоточним лобовим фрикційним варіатором та метод вибору його робочих параметрів. Встановлено, що запропонований механізм відтягнення полотна, працездатний, надійний та ефективний в роботі. Використання такого механізму у складі круглов'язальної машини дозволяє підвищити надійність та довговічність роботи як самої машини, так і якість в'язального полотна. Результати досліджень можуть бути використані при розробці нових моделей круглов'язальних машин.

Ключові слова: *круглов'язальна машина, механізм відтягнення в'язального полотна, стабільність зусилля відтягнення полотна, лобовий фрикційний варіатор, двопоточний лобовий фрикційний варіатор.*

V.G. ZDORENKO
Kyiv National University of Technologies and Design
N.N. ZASHCHEPKINA
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

INCREASE IN THE EFFICIENCY OF THE MECHANISM OF THE DELAYING OF THE WEB OF A CIRCULAR KNITTING MACHINE

Increasing the effectiveness of the mechanism of pulling the linen circular knitting machine, due to the stability of the pulling force can be achieved using the speed variator in its composition. Studies show that, based on the design features of the mechanisms of web pulling, preference should be given to the front two-flow friction variators. As a result of the research, a new design of the mechanism for pulling the web of a circular knitting machine with a double-flow front friction variator and a method for selecting its operating parameters have been developed. It is established that the proposed mechanism for web pulling, workable, reliable and efficient in operation. The use of such a mechanism in the circular knitting machine makes it possible to increase the reliability and durability of the work of both the machine itself and the quality of the knitting cloth. The results of the research can be used in the development of new models of circular knitting machines.

Key words: *circular knitting machine, knitting web pulling mechanism, stability of web pulling force, frontal friction variator, two-flow front friction variator.*

Вступ

Перспективним напрямком підвищення ефективності роботи круглов'язальних машин, є удосконалення їх механізмів, зокрема механізму відтягнення полотна. Дослідження [1–8] показують, що продуктивність круглов'язальних машин та якість полотна суттєво залежать від ефективності роботи механізму відтягнення полотна, зокрема стабільності зусилля його відтягнення. Тому проблема підвищення ефективності роботи механізмів відтягнення полотна є однією із актуальних проблем легкого машинобудування. Для розв'язання цієї проблеми важливим є аналіз впливу параметрів механізму відтягнення полотна на ефективність роботи круглов'язальної машини, розробка нових конструкцій механізмів та методу їх розрахунків.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень обрано механізм відтягнення полотна круглов'язальної машини з двопоточним лобовим варіатором та метод вибору його параметрів. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи теорії проектування машин і апаратів легкої промисловості та теорії деталей машин.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності роботи механізму відтягнення полотна круглов'язальної машини (підвищення рівномірності та стабільності зусилля відтягування полотна), стаття присвячена розробці нової конструкції механізму відтягнення полотна з двопоточним фрикційним лобовим варіатором та методу вибору його робочих параметрів.

Результати та їх обговорення

Відомий механізм відтягнення полотна круглов'язальної машини, що містить ведучий та два ведені відтяжні валики, кінематично зв'язані між собою за допомогою шестерень, встановлених на їх кінцях, та двопоточний лобовий фрикційний варіатор, з'єднаний з ведучим відтяжним валиком [3]. Кінематичне з'єднання лише одних кінців ведучого та ведених відтяжних валиків між собою зумовлює нерівномірність притиску відтяжних валиків до полотна, що призводить до зниження ефективності роботи механізму відтягнення полотна, а саме: до зниження якості полотна.

Враховуючи вище сказане, в основу досліджень авторів поставлена задача створити такий механізм відтягнення полотна круглов'язальної машини, в якому шляхом введення нових елементів та їх зв'язків забезпечилось би підвищення ефективності його роботи – підвищення якості полотна.

Поставлена задача вирішена тим, що запропонований механізм відтягнення полотна круглов'язальної машини додатково обладнаний додатковими шестернями, які встановлені на других кінцях ведучого та ведених відтяжних валиків та кінематично їх зв'язують.

Обладнання механізму відтягнення полотна додатковими шестернями, які встановлені на других кінцях ведучого та ведених відтяжних валиків та кінематично їх зв'язують, забезпечує рівномірність притиску відтяжних валиків до полотна, що призводить до підвищення ефективності роботи механізму відтягнення полотна круглов'язальної машини, а саме: до підвищення якості полотна.

Схема запропонованого авторами механізму відтягнення полотна круглов'язальної машини представлена на рис. 1.

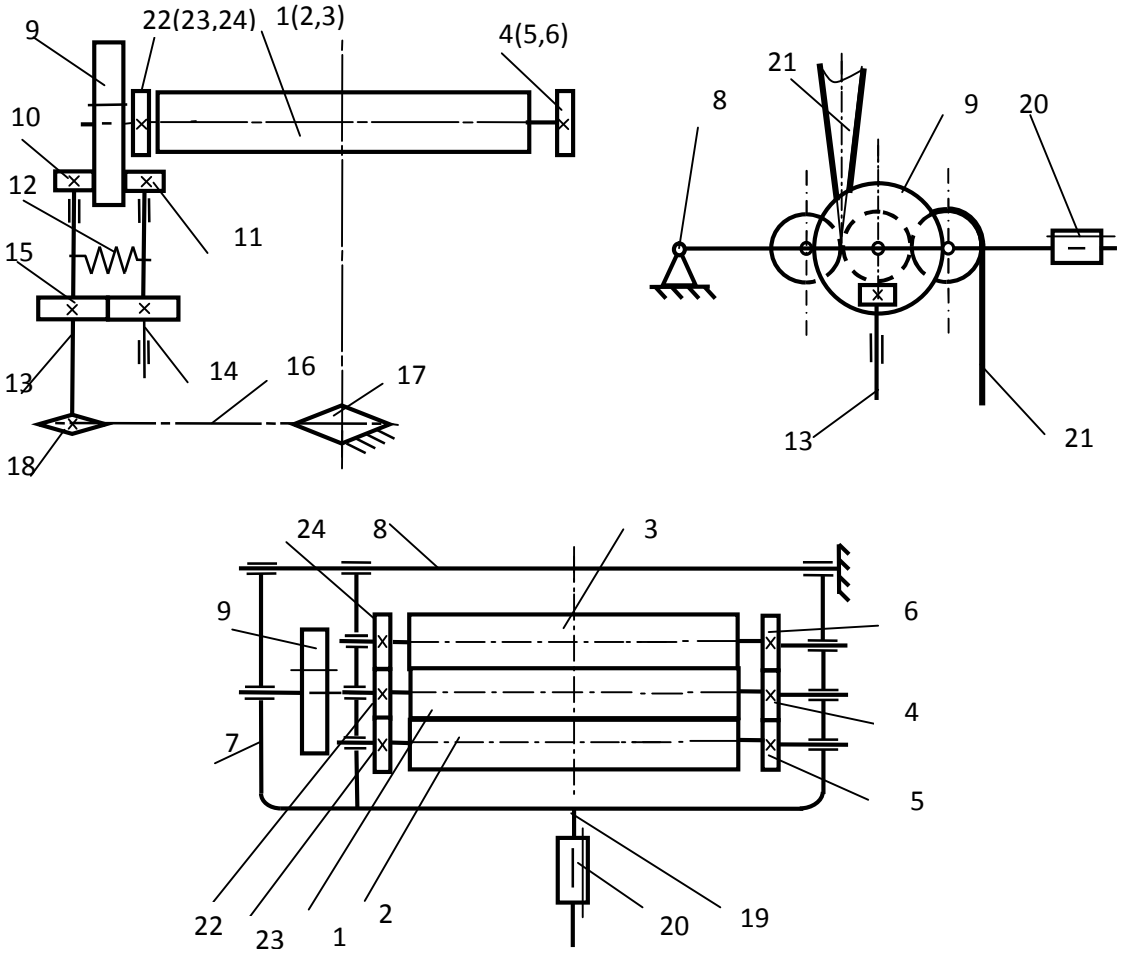


Рис. 1. Схема механізму відтягнення полотна круглов'язальної машини: 1 – ведучий відтяжний валик; 2, 3 – ведені відтяжні валики; 4, 5, 6 – циліндричні шестерні; 7 – рама; 8 – нерухома вісь; 9 – диск варіатора; 10, 11 – котки; 12 – пружина; 13 – вертикальний приводний вал; 14 – проміжний вал; 15 - зубчаста передача; 16 – ланцюгова передача; 17, 18 – зірочки; 19 – направляюча; 20 – вантаж; 21 – полотно; 22, 23, 24 – додаткові шестерні

Принцип роботи механізму такий. При вмиканні круглов'язальної машини механізм відтягнення полотна починає обертатися навколо осі машини. Ланцюг ланцюгової передачі 16 починає обертатися навколо нерухомої ведучої зірочки 17 і приводить в обертальний рух ведену зірочку 18, жорстко закріплену на вертикальному приводному валу 13, приводячи його в обертання. Обертальний рух вертикального приводного вала 13 передається котку 10, жорстко з ним з'єднаному, і далі за допомогою зубчастої передачі 15 – проміжному валу 14 та котку 11, жорстко з ним з'єднаному. Котки 10, 11 за допомогою пружини 12 притискуються до диска 9 (зубчасте зачеплення циліндричної зубчастої передачі 15 виконано з можливістю радіального переміщення зубчастих коліс і, відповідно, котків). Сила тертя в парах коток 10 – диск 9 і коток 11 – диск 9, що виникає при цьому, зумовлює обертальний рух диска 9 і з'єднаного з ним ведучого відтяжного валика 1, на якому він закріплений. Обертальний рух ведучого відтяжного валика 1 за допомогою зубчастого зачеплення циліндричних шестерень 4-5, 4-6 та додаткових шестерень 22-23, 22-24 передається веденим відтяжним валикам 2, 3, здійснюючи процес відтягнення полотна 21, заправленого між відтяжними валиками. В разі, коли лінійна швидкість відтяжних валиків буде меншою ніж швидкість в'язання (відтяжки) полотна 21, рама 7 разом з відтяжними валиками 1, 2, 3 опускається, повертаючись

навколо нерухомої осі 8 за годинниковою стрілкою (згідно з фіг. 2). При цьому диск 9 двопоточного лобового фрикційного варіатора опускається відносно котків 10, 11, зменшуючи таким чином робочий радіус диска. Передаточне число лобового фрикційного варіатора зменшується, збільшуючи частоту обертання диска 9 і, відповідно, відтяжних валиків 1, 2, 3. Відтяжні валики, маючи при цьому більшу лінійну швидкість, піднімаються разом з рамою 7 по полотну 21 (рама 7 повертається навколо нерухомої осі 8 проти годинникової стрілки). При цьому робочий радіус диска збільшується, що призводить до збільшення передаточного числа варіатора і, таким чином, зменшення лінійної швидкості відтяжних валиків. Далі процес зміни положень диска 9 відносно котків 10, 11 повторюється до тих пір, поки не зрівняється лінійна швидкість відтяжних валиків зі швидкістю в'язання полотна. В подальшому процес відтяжки полотна здійснюється стабільно. Цей процес, як бачимо, встановлюється автоматично.

Величина зусилля відтягування полотна регулюється за допомогою положення вантажу 20 на направляючій 19. Обладнання механізму відтягнення полотна додатковими шестернями 22, 23, 24, встановленими на других кінцях ведучого та ведених відтяжних валиків з можливістю кінематичного їх з'єднання, забезпечує рівномірність притиску відтяжних валиків до полотна, що призводить до підвищення ефективності роботи механізму, а саме: до підвищення якості полотна.

Наявність двопоточного лобового фрикційного варіатора дозволяє розподілити потужність, що передається відтяжним валикам 1, 2, 3, на два потоки (перший потік: вертикальний приводний вал 13 – коток 10 – диск 9; другий потік: вертикальний приводний вал 13 – зубчаста передача 15 – проміжний вал 14 – коток 11 – диск 9) та автоматично змінювати частоту обертання ведучого відтяжного валика 1 таким чином, що швидкість відтягування полотна 21 залишається сталою. Також сталою залишається і сила натягу полотна 21 при його відтяжці, оскільки сила тертя в зоні притиску котків 10, 11 до диску 9 також залишається сталою (притиск котків 10, 11 до диску 9 здійснюється за допомогою пружини 12 зі сталою силою).

З метою забезпечення надійності та довговічності роботи механізму відтягування полотна слід приділяти в першу чергу увагу вибору раціональних параметрів варіатора. При цьому розміри робочих елементів варіатора повинні відповідати наступній умові контактної витривалості пар котки – диск [4, 6]:

$$d_1 \geq 240 \sqrt[3]{\frac{\beta P E}{2\lambda\psi u_1 f n[\sigma_{max}]^2}}, \quad (1)$$

де d_1 – діаметр котка;

β – коефіцієнт запасу зчеплення котка з диском;

P – потужність варіатора,

$$P = \frac{F_{вт} v_{вт}}{\eta}, \quad (2)$$

де $F_{вт}$ – сила відтягнення полотна,

$$F_{вт} = F_k Z; \quad (3)$$

де F_k – сила натягу, що діє на одну петлю полотна при відтяжці;

Z – кількість петель полотна (кількість голок в голковому циліндрі).

$v_{вт}$ – швидкість відтягнення полотна [3],

$$v_{вт} = \frac{q v_ц B}{\pi d_ц}; \quad (4)$$

де q – кількість в'язальних систем круглов'язальної машини;

$v_ц$ – лінійна швидкість голкового циліндра;

B – висота петельного ряду полотна;

$d_ц$ – діаметр голкового циліндра;

η – ККД варіатора

E – приведений модуль пружності матеріалів котка та диска;

2 – коефіцієнт, що враховує наявність двох котків;

λ – коефіцієнт, що враховує можливу нерівномірність передачі потужності двома котками;

ψ – коефіцієнт ширини котка [4],

$$\psi = \frac{b}{d_1}; \quad (5)$$

де b – ширина котка;

u_1 – мінімальне передаточне число варіатора;

f – коефіцієнт тертя пар котки – диск;

n – частота обертання котків,

$$n = n_{вт} u_1; \quad (6)$$

$$n_{вт} = \frac{60\, q\, v_ц\, B}{\pi^2 d\, d_ц}; \qquad (7)$$

де $[\sigma_{max}]$ – допустиме контактне напруження в парі коток – диск.

Знайдемо параметри механізму відтягнення полотна та ефективність його роботи (стабільність зусилля відтягнення полотна) при використанні його у складі однофонтурної круглов'язальної машини КО-2 з діаметром голкового циліндра $d_ц = 450$ мм, для якої [8, 9]: $Z = 1224$; $q = 50$; $v_ц = 1{,}1$ м/с; $B = 1$ мм; $F_{вт} = 183{,}6$ Н; $F_k = 0{,}15$ Н; $F_н = 36{,}72$ Н; $d = 50$ мм.

При цьому, враховуючи конструктивні особливості лобового фрикційного варіатора механізму відтяжки полотна, приймаємо: $\beta = 1{,}5;\ E = 2{,}15 \cdot 10^5\, МПа;\ \psi = 0{,}2;\ u_1 = 2;\ f = 0{,}15;\ [\sigma_{пов}] = 800\, МПа$.

Використовуючи приведений вище метод (1)…(7), знаходимо:

$P = 8{,}92$ Вт; $n = 29{,}72$ об/хв; $n_{вт} = 14{,}86$ об/хв; $n = 29{,}72$ об/хв..

Тоді згідно з (1) маємо: $d_1 \geq 28{,}53$ мм.

Враховуючи одержаний результат, приймаємо наступні параметри варіатора:

$d_1 = 30$ мм; $d_2 = 60$ – діаметр диску ($d_2 = (1{,}5...3{,}0) d_1$) [4]; $b = 6$ мм ($b = \psi\, d_1$).

Необхідне передаточне число ланцюгової передачі u_2 та число зубів зірочок 17 (Z_1), 18 (Z_2) (рис. 1) можемо знайти із залежності:

$$u_2 = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{u}{u_1} = \frac{n_ц}{n_{вт}\, u_1}, \qquad (8)$$

де u – загальне передаточне число привода,

$$u = \frac{n_ц}{n_{вт}}; \qquad (9)$$

$n_ц$, $n_{вт}$ – частота обертання відповідно голкового циліндра машини та відтяжних валиків [1, 2],

$$n_ц = \frac{60\, v_ц}{\pi\, d_ц} = 46{,}68 \text{ об/хв.}; \quad n_{вт} = \frac{60\, q\, v_ц\, B}{\pi^2 d\, d_ц} = 14{,}86 \text{ об/хв.}; \qquad (10)$$

d – діаметр відтяжних валиків.

Оскільки ланцюгова передача приводу механізму відтягування полотна тихохідна можемо прийняти [4]: $Z_1 = 11$. Тоді згідно з (8) маємо:

$$Z_2 = \frac{n_ц\, Z_1}{n_{вт}\, u_1} = 17.$$

Стабільність зусилля відтягування полотна круглов'язальної машини КО-2 при наявності запропонованого механізму (рис. 1) можемо оцінити коефіцієнтом стабільності K [2]:

$$K = \frac{F_{вт\,min}}{F_{вт\,max}}, \qquad (11)$$

де $F_{вт\,min}$, $F_{вт\,max}$ – відповідно мінімальне та максимальне зусилля відтягування полотна.

Враховуючи конструктивні особливості запропонованого механізму відтягування полотна, можемо записати:

$$F_{вт\,min} = F_{вт} - F_n \frac{l_2}{l_1}; \quad F_{вт\,max} = F_{вт} + F_n \frac{l_2}{l_1}, \qquad (12)$$

де F_n – зусилля переміщення диска відносно котків при повороті рами 7 (рис. 1), $F_n = 0{,}59$ Н, [4];

l_1, l_2 – плечі сил $F_{вт}$, F_n відповідно, $l_1 = 250$ мм, $l_2 = 270$ мм.

Сила відтягування полотна $F_{вт}$ знаходиться із умови (3): $F_{вт} = F_k Z = 183{,}6$ Н.

Враховуючи параметри круглов'язальної машини КО-2 та приведений вище метод розрахунку, знаходимо коефіцієнт стабільності зусилля відтягування полотна K, що його забезпечує запропонований механізм (11): $K = 0{,}99$.

Висновки. Аналізуючи результати досліджень, можемо зробити наступні висновки:

- запропонований механізм відтягнення полотна круглов'язальної машини дозволяє підвищити надійність та довговічність роботи як самого механізму, так і якість трикотажного полотна за рахунок підвищення коефіцієнту стабільності відтягування полотна та рівномірності притиску відтяжних валиків;
- запропонований механізм відтягнення полотна та метод вибору його робочих параметрів можуть бути використані не тільки для круглов'язальних, а і для інших типів в'язальних машин.

Література

1. Мойсеєнко Ф.А. Проектування в'язальних машин / Мойсеєнко Ф.А. – Харків : Основа, 1994. – 336 с.

2. Защепкіна Н.М. Інженерні методи проектування заданих властивостей матеріалів : монографія / Защепкіна Н.М. –Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2016. – 207 с.

3. Піпа Б.Ф. Механізми відтяжки та накатування полотна круглов'язальних машин / Б.Ф. Піпа, О.М. Хомяк, О.Ю. Олійник. – К. : КНУТД, 2009. – 234 с.

4. Здоренко В.Г. Ефективність використання відцентрової фрикційної муфти для зниження динамічних навантажень в приводі в'язальних машин / В.Г. Здоренко, Н.М. Защепкіна // Вісник КНУТД. – 2016. – № 2 (96). – С. 34–40.

5. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. – М. : Наука, 1980. – 976 с.

6. Защепкіна Н.М. Підвищення стабільності відтяжки полотна круглов'язальної машини / Н.М. Защепкіна, Б.Ф. Піпа // Вісник ХНУ. – 2013. – № 3. – С. 84–86.

7. Пат. України на корисну модель № 57144, МПК D04 B 15/88. Механізм відтяжки полотна круглов'язальної машини / Б.Ф. Піпа, В.Г. Здоренко, О.Ю. Олійник. – Опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4, 2 с.

8. Піпа Б. Ф. Деталі машин / Б. Ф. Піпа, О. М. Хомяк, А. І. Марченко. – К. : КНУТД, 2011. – 358 с.

9. Машины кругловязальные типа КО-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Черновцы. 1992. – 86 с.

10. Защепкіна Н.М. Вплив конструкції системи гальмування круглов'язальної машини на ефективність роботи та вибір її параметрів / Н.М. Защепкіна, В.Г. Здоренко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – № 2. – С. 63–66.

References

1. Mojseєnko F.A. Proektuvannja v'jazal'nih mashin / Mojseєnko F.A. – Harkiv : Osnova, 1994. – 336 s.

2. Zashhepkina N.M. Inzhenerni metodi proektuvannja zadanih vlastivostej materialiv : monografija / Zashhepkina N.M. –Vinnicja : TOV «Nilan-LTD», 2016. – 207 s.

3. Pipa B.F. Mehanizmi vidtjazhki ta nakatuvannja polotna kruglov'jazal'nih mashin / B.F. Pipa, O.M. Homjak, O.Ju. Olijnik. – K. : KNUTD, 2009. – 234 s.

4. Zdorenko V.G. Efektivnist' vikoristannja vidcentrovoї frikcijnoї mufti dlja znizhennja dinamichnih navantazhen' v privodi v'jazal'nih mashin / V.G. Zdorenko, N.M. Zashhepkina // Visnik KNUTD. – 2016. – № 2 (96). – S. 34–40.

5. Bronshtejn I.N. Spravochnik po matematike / Bronshtejn I.N., Semendjaev K.A. – M. : Nauka, 1980. – 976 s.

6. Zashhepkina N.M. Pidvishhennja stabil'nosti vidtjazhki polotna kruglov'jazal'noї mashini / N.M. Zashhepkina, B.F. Pipa // Visnik HNU. – 2013. – № 3. – S. 84–86.

7. Pat. Ukraïni na korisnu model' № 57144, MPK D04 B 15/88. Mehanizm vidtjazhki polotna kruglov'jazal'noї mashini / B.F. Pipa, V.G. Zdorenko, O.Ju. Olijnik. – Opubl. 10.02.2011, Bjul. № 4, 2 s.

8. Pipa B. F. Detali mashin / B. F. Pipa, O. M. Homjak, A. I. Marchenko. – K. : KNUTD, 2011. – 358 s.

9. Mashiny kruglovjazal'nye tipa KO-2. Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po jekspluatacii. – Chernovcy. 1992. – 86 s.

10. Zashhepkina N.M. Vpliv konstrukciї sistemi gal'muvannja kruglov'jazal'noї mashini na efektivnist' roboti ta vibir її parametriv / N.M. Zashhepkina, V.G. Zdorenko // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2017. – № 2. – S. 63–66.

Рецензія/Peer review : 09.07.2017 р. Надрукована/Printed :30.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редколегією

УДК 621.01

С.О. КОШЕЛЬ, Г.В. КОШЕЛЬ
Київський національний університет технологій та дизайну

АНАЛІЗ ПЛОСКИХ МЕХАНІЗМІВ ВИЩИХ КЛАСІВ З ШАТУНОМ, ЩО МАЄ ВИГЛЯД СКЛАДНОЇ ЛАНКИ

Багатоланкові плоскі механізми все частіше застосовуються в технологічному обладнанні легкої промисловості. Відсутність універсального способу кінематичного дослідження таких механізмів дозволяє стверджувати про актуальність робіт з кінематичного аналізу складних механізмів. Розроблено послідовність дій для кінематичного дослідження швидкостей точок ланок плоского механізму третього класу графоаналітичним способом, що базується на положеннях курсу теоретичної механіки про миттєвий обертальний рух ланок механізму, що мають плоскопаралельний рух. Графоаналітичним методом визначено вектори швидкостей точок структурної групи ланок третього класу третього порядку складного плоского механізму, в якому умовно змінено ведучу ланку, що призвело до зменшення класу механізму та дозволило спростити його дослідження.

Ключові слова: *механізм; кінематичне дослідження; вектор швидкості; план швидкостей.*

S.O. KOSHEL, A.V. KOSHEL
Kyiv National University of Technologies and Design

ANALYSIS OF FLAT MECHANISMS UPPER CLASSES WITH A COLLAPSIBLE LINK

Complex planar mechanisms are increasingly being used in the process equipment of light industry. The lack of a universal method of kinematic research of these mechanisms allows us to assert the relevance of work on the kinematic analysis of multilink mechanisms. Purpose of the work is development sequence of actions for kinetic research velocities of the points of the planar links complex mechanism of graphic-analytical method that is based on the provisions of the course theoretical mechanics about instantaneous velocity center links of the mechanism, which have plane-parallel motion. Analyzed the velocity vectors of the points of the structural links of group third class of third-order complex planar mechanism graphic-analytical method, which provisionally amended of the leading link that has led to a reduction class of mechanism and allowed to simplify its research.

Keywords: mechanism, kinematic research, the velocity vector, plan of the velocity vectors.

Вступ

Вдосконалення існуючого технологічного обладнання легкої промисловості та проектування нових машин пов’язано з досконалістю методів аналізу структурних груп ланок плоских механізмів, з яких останні складаються. Найбільш розробленими є методи дослідження діад або двоповодкових груп.

Структурні групи, до складу яких входять чотири ланки, що утворюють групи третього класу третього порядку або четвертого класу другого порядку, з одного боку, є достатньо відомими разом з розробленими методами їх структурно-кінематичного та динамічного дослідження, а з іншого – можуть бути використані для відпрацювання нових підходів щодо аналізу складних плоских структурних груп ланок, які застосовуються для синтезу механізмів четвертого та вище класів, що мають значні перспективи використання в механізмах технологічного обладнання легкої промисловості з одночасною перевіркою отриманих результатів за допомогою відомих способів дослідження.

Постановка завдання

Розробити оригінальну послідовність дій для кінематичного дослідження швидкостей точок, що співпадають з геометричними центрами кінематичних пар структурної групи третього класу третього порядку з шатуном, який має вигляд складної ланки, що базується на положеннях курсу теорії механізмів і машин про кінематичний аналіз механізмів та положень курсу теоретичної механіки про миттєвий центр швидкостей (МЦШ) твердого тіла, що має плоскопаралельний рух.

Аналіз досліджень та публікацій

Питанням практичного використання та теоретичного дослідження структурних, кінематичних та динамічних параметрів плоских складних механізмів третього та вище класів присвячена значна кількість публікацій останніх десятиріч, що пояснюється тими перевагами, які мають такі механізми по відношенню до інших, а саме: складністю траєкторій та законів руху окремих точок ланок механізмів, які викликані необхідністю забезпечення виконання технологічних процесів, можливістю оптимального розподілення технологічних та динамічних зусиль між більшою кількістю ланок, що застосовується в багатоланкових структурних утвореннях з одночасним зменшенням мас їх ланок та покращенням динамічних умов на збільшених швидкостях роботи механізмів тощо.

Застосування багатоланкових структурних груп ланок в певних механізмах захищено патентами на корисну модель [1–3]. Питанням теоретичного аналізу механізмів вищого класу присвячується ряд робіт [5–7], зокрема механізмів обладнання легкої промисловості [8, 9].

Задачі кінематичного дослідження складних плоских механізмів залишаються актуальними тому, що в кожному конкретному випадку дослідження механізму вищого класу необхідно використовувати оригінальну послідовність дій, яка викликана одночасним застосуванням декількох способів кінематичного аналізу, а універсального способу дослідження різноманіття складних механізмів вищих класів не існує.

Формулювання цілей

Визначити швидкість точок складного плоского механізму, що співпадають з геометричними центрами кінематичних пар структурної групи третього класу третього порядку з шатуном, який має вигляд складної ланки.

Результати та їх обговорення

Розглянемо складний плоский шарнірно-важільний механізм третього класу (рис. 1), що складається з ведучої ланки 1, що з'єднана зі стояком 0 та інших ведених ланок 2÷5, серед яких ланки 2, 5 – шатуни, 3, 4 – коромисла. Початковий механізм (ланки 0, 1) разом з структурною групою третього класу третього порядку, до складу якої надходить сукупність чотирьох ланок 2÷5 (n=5) разом з шістьма кінематичними парами п'ятого класу A, B, C, D, K, N (p_5=7) утворюють механізм третього класу з ступенем вільності одиниця за формулою Чебишева: $W=3n-2p_5-p_4$, тобто утворюють механізм з одним ведучим кривошипом, формула будови якого має вигляд:

$$1клас \ \ (ланки 0,1) \rightarrow 3клас \ \ 3порядок \ \ (ланки 2 \div 5). \quad (1)$$

Параметрами для кінематичного дослідження механізму є кутова швидкість кривошипу 1 (ω_1=const, c^{-1}) та масштаб довжин (Kl, м/мм) кінематичної схеми механізму.

Використовуємо графоаналітичний метод кінематичного дослідження. Задачу розв'язуємо за допомогою основних положень кінематичного аналізу механізмів курсу теорія механізмів і машин та положень курсу теоретична механіка, щодо дослідження плоскопаралельного руху твердого тіла.

Звертаємо увагу на особливість структурного аналізу механізму, що досліджується: базисна ланка 5 структурної групи утворює кінематичні пари C, D, відповідно, з двома коромислами 4 та 5, які дозволяють визначити напрямки векторів швидкостей точок, що співпадають з геометричними центрами цих шарнірів ($\vec{V}_C \perp CK$, $\vec{V}_D \perp DN$), тому положення МЦШ шатуна 5 (P_5) визначаємо, як точку перетину перпендикулярів до векторів $\vec{V}_C$, $\vec{V}_D$, що побудовані в точках C та D.

На даному етапі кінематичного дослідження спостерігаємо навмисне порушення послідовності кінематичного аналізу, яка зазвичай повинна збігатися з послідовністю приєднання структурних груп згідно з формулою механізму (1). Так, згідно з формулою будови спочатку необхідно було би визначити положення особливої точки S_1, для якої складається система векторних рівнянь, що дозволяє визначити вектор швидкості $\vec{V}$ s_1 за величиною та напрямком**,** який разом з векторами можливих швидкостей точки С ($\vec{V}_C^1 - \vec{V}_C^5$) та вектором $\vec{V}_D$ дозволили б з'ясувати дійсне положення точки P_5. Робимо висновок: для складних плоских механізмів вищого класу послідовність кінематичного аналізу обумовлена, в першу чергу, оптимальністю витраченого часу від початку розв'язання задачі до отримання результатів дослідження.

Подальша послідовність аналізу пов'язана з тим, що в механізмі кінематична пара B утворена двома ланками, що мають плоскопаралельний рух: з одного боку положення МЦШ шатуна 5 дозволяє визначити напрямок вектора швидкості точки B ($\vec{V}_B \perp P_5B$), з іншого – положення МЦШ іншого шатуна 2 обумовлено напрямком вектора швидкості іншої точки цього ж шатуна, який визначається за умовою належності точки A до ведучої ланки механізму ($\vec{V}A \perp OA$). За напрямками векторів швидкостей двох точок ланки 2 визначаємо положення МЦШ шатуна 2: точка P_2 знаходиться на перетині ліній P_5B та OA.

Тепер послідовність кінематичного дослідження механізму може ураховувати формулу, згідно з якою був синтезований механізм третього класу. Розраховуємо швидкість точки А за величиною (V_A) та напрямком, як точки що належить до кривошипу 1. В довільному масштабі Kl будуємо на плані швидкостей вектор $\vec{P}a$ та розраховуємо величину миттєвої кутової швидкості обертання шатуна 2 навколо МЦШ P_2 за рівнянням:

$$\omega_2 = V_A / P_2A, \quad (2)$$

де P_2A – відстань на плані швидкостей.

Величину миттєвої кутової швидкості обертання шатуна 5 навколо МЦШ P_5 визначаємо за рівнянням:

$$\omega_5 = V_B / P_5B = \omega_2 \bullet P_2B / P_5B, \quad (3)$$

де P_2B, P_5B – відстані на плані швидкостей.

Напрямок кутової швидкості ω_2 визначаємо за напрямком вектора лінійної швидкості $\vec{V}_A$, який обумовлений наперед заданим напрямком кривошипу 1, а напрямок кутової швидкості ω_5 знаходимо за напрямком вектора лінійної швидкості $\vec{V}_B$, яка спрямована за перпендикуляром до відрізка P_2B в бік відповідний до напрямку кутової швидкості ω_2.

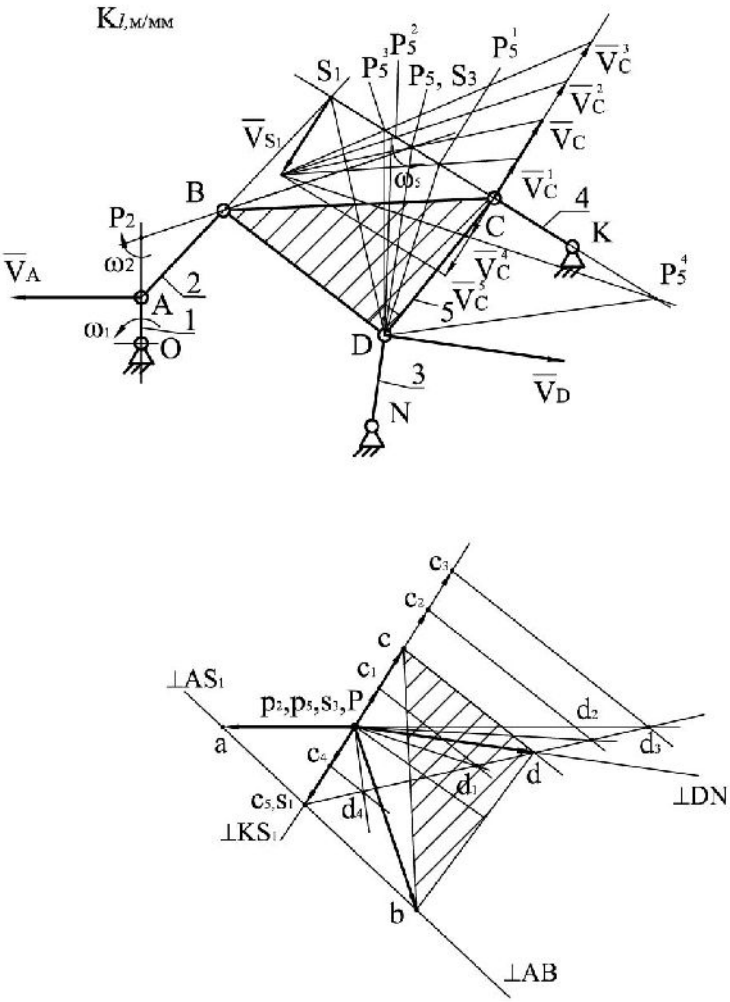


Рис. 1. Кінематична схема та план швидкостей механізму третього класу

Розраховуємо величини лінійних швидкостей точок *D* та *C*, як точок які разом з шатуном 5 роблять миттєво обертальний рух навколо МЦШ P_5:

$$V_D = \omega_5 \bullet P_5D \,, V_C = \omega_5 \bullet P_5C \,, \tag{4}$$

де P_5D ,P_5C відстані на плані швидкостей.

Розраховуємо величину миттєвих кутових швидкостей обертання ланок *DN*, *CK* як коромисел, що обертаються навколо точок *N* та *K* за рівнянням:

$$\omega_3 = V_D / DN \,, \omega_4 = V_C / CK \,.$$

Напрямки кутових швидкостей ω_3, ω_4 обумовлені, відповідно, напрямками лінійних швидкостей $\vec{V}_D$ та $\vec{V}_C$.

Висновки

Розроблено оригінальну послідовність дій для кінематичного дослідження швидкостей точок, що співпадають з геометричними центрами кінематичних пар структурної групи третього класу третього порядку з шатуном, який має вигляд складної ланки, що базується на положеннях курсу теорія механізмів і машин про кінематичний аналіз механізмів та положень курсу теоретична механіка про миттєвий центр швидкостей (МЦШ) твердого тіла, що має плоскопаралельний рух.

Запропоновану послідовність кінематичного аналізу можна рекомендувати для проведення аналогічних досліджень складних плоских механізмів четвертого та вище класів.

Література

1. Патент РФ 2201348 Кривошипно-ползунный механизм пресса / Дворников Л.Т., Чужиков О.С., Стариков С.П. – 27.03.2003.

2. Патент РФ 2303699 Секция механизированной крепи / Дворников Л.Т., Князев А.С., Стариков С.П. – 27.07.2007.

3. Патент РФ 2332260 Двухщековая дробильная машина / Дворников Л.Т., Стариков С.П. – 27.08.2008.

4. Кикин А.Б. Аналитико-оптимизационный синтез шестизвенного механизма с выстоем / А.Б. Кикин, Э.Е. Пейсах // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 5. – С. 79–83.

5. Дворников Л.Т. Исследование кинематики и кинетостатики плоской шарнирной шестизвенной группы Ассура с четырехугольным замкнутым изменяемым контуром / Л.Т. Дворников, С.П. Стариков // Известия ВУЗов, «Машиностроение». – 2008. – № 4. – С. 3–10.

6. Чашников Д.О. Кинематическое исследование плоского восьмизвенного механизма шестого класса с поступательной парой / Д.О. Чашников, В.В. Гаряшин // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 231–232.

7. Чашников Д.О. Кинематическое исследование плоского восьмизвенного механизма шестого класса с поступательной парой аналитическим методом / Д.О. Чашников, В.В. Гаряшин // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 158–159.

8. Гебель Е. С. Моделирование кинематики механизма игл основовязальной машины / Е. С. Гебель, Е.В. Солонин // Теоретические знания в практические дела : сборник материалов X междунар. научно-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 2. – Омск : Филиал ГОУ ВПО «РосЗИТЛП» в г. Омск, 2009. – С. 211–215.

9. Кикин А.Б. Синтез рычажных механизмов для привода нитераскладчика мотальной машины / А.Б. Кикин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 1. – С. 115–119.

10. Кошель С.О. Структурний аналіз складних плоских механізмів четвертого класу / С.О. Кошель, Г.В. Кошель // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 1. – С. 72–79.

References

1. Patent RF 2201348 Krivoshipno-polzunnyiy mehanizm pressa [Slider-crank mechanism for the press], avtoryi Dvornikov L.T., Chuzhikov O.S., Starikov S.P., 27.03.2003 g.

2. Patent RF 2303699 Sektsiya mehanizirovannoy krepi [Section mechanized system], avtoryi Dvornikov L.T., Knyazev A.S., Starikov S.P., 27.07.2007 g.

3. Patent RF 2332260 Dvuhschekovaya drobilnaya mashina [Two jaw crusher], avtoryi Dvornikov L.T., Starikov S.P., 27.08.2008 g.

4. Kikin A.B. Analitiko-optimizacionnyj sintez shestizvennogo mehanizma s vystoem [Analytical and optimal synthesis of six-membered mechanism with dwell] / A.B. Kikin, Je.E. Pejsah// Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti [Technology textile industry]. – 2008. – № 5. – S. 79-83.

5. Dvornikov L.T. Issledovanie kinematiki i kinetostatiki ploskoj sharnirnoj shestizvennoj gruppy Assura s chetyrehugol'nym zamknutym izmenjaemym konturom [The study of kinematics and Kinetostatics flat hinged six-membered group Assur quadrangular closed loop variable]/ L.T. Dvornikov, S.P. Starikov // Izvestija VUZov, «Mashinostroenie» ["Engineering"]. – 2008. – №4. – S. 3 – 10.

6. Chashnikov D.O. Kinematicheskoe issledovanie ploskogo vosmizvennogo mehanizma shestogo klassa s postupatelnoy paroy [Kinematic study of planar six sixth grade mechanism with sliding pair] / D.O. Chashnikov, V.V. Garyashin // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. – 2011. -№ 7. – S. 231 – 232.

7. Chashnikov D.O. Kinematicheskoe issledovanie ploskogo vosmizvennogo mehanizma shestogo klassa s postupatelnoy paroy analiticheskim metodom [Kinematic study of planar six sixth grade mechanism with sliding pair analytical method] / D.O. Chashnikov, V.V. Garyashin // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. - 2012. - №6. – S. 158 – 159.

8. Gebel' E. S. Modelirovanie kinematiki mehanizma igl osnovovjazal'noj mashiny / E. S. Gebel', E. V. Solonin [Modeling dynamics of the machine needles warp machine] // Sbornik materialov H mezhdunar. nauchno-prakt. konf. «Teoreticheskie znanija v prakticheskie dela»: v 2 ch. – Omsk.: Filial GOU VPO «RosZITLP» v g. Omske, 2009. Ch.2. – S. 211 – 215.

9. Kikin A.B. Sintez rychazhnyh mehanizmov dlja privoda niteraskladchika motal'noj mashiny [Synthesis of linkage to drive the traverse control winder] / A.B. Kikin // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti [Technology textile industry]. – 2005. – № 1. – S. 115 – 119.

10. Koshel S.O. Strukturniy analIz skladnih ploskih mehanIzmIv chetvertogo klasu [Structurally analiz folding flat mehanizmiv fourth class] / S.O. Koshel, G.V. Koshel // Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. - 2015. - №1. – S. 72-79

Рецензія/Peer review : 19.06.2017 р. Надрукована/Printed :25.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Злотенко Б.М.

УДК 821. 894+ 620.17

В.Г. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕНКО, П.В. МАТВІЇШИН
Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ВОДНЮ НА ВТОМНУ ВИТРИВАЛІСТЬ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ

Наведені результати експериментальних досліджень втомної витривалості при згині та фретингу зі згином зразків з різних сталей після іонного азотування в водневих і безводневих середовищах при випробуваннях в різних середовищах. Показано шкідливий вплив водню на втомну витривалість сталей при згині та фретингу зі згином.

***Ключові слова**: втомна витривалість, згин, водень, середовище, іонне азотування, водневе середовище, безводневе середовище, фретинг.*

V.G. KAPLUN, V.A. GONCHAR, T.V. DONCHENKO, P.V. MATVIISHIN
Khmelnytskyi National university

THE INFLUENCE OF HYDROGEN ON THE FATIGUED ENDURANCE OF STEELS AFTER IONIC NITRIDING

The results of experimental studies at multi- cycle and little-cycle fatigue in bending and fretting with bending of samples with different steels after ionic nitriding in hydrogen and hydrogen-free environments at tests in different environments. The grounded effect of hydrogen on the multi-cycle and little-cycle fatigue of steels after bending and fretting with bending. The conclusions and recommendations on the application of the technology of ionic nitriding in non-hydrogen environments for increasing the durability of steels with the multi-cycle and little-cycle fatigue bending and fretting with bending.

***Keywords:** fatigue endurance, bend, hydrogen, environment, the ionic nitriding, hydrogen environment, hydrogen-free environment, fretting.*

Вступ

В експлуатаційних умовах під впливом робочого середовища змінюються багато властивостей матеріалу. Одним з найактивніших середовищ, що впливають на фізико-механічні властивості металів, є газоподібний водень. З газової фази водень адсорбується у вигляді іонів і атомів [1]. Водень, легко дифундуючи в металеві матеріали і накопичуючись у них, впливає на структуру, фазовий склад і фізико-механічні властивості [1–14]. Водень може знаходитися в металі, утворюючи тверді розчини «нового» типу, сегрегувати в недосконалості решітки (типу мікропорожнеч), вступати в хімічну сполуку з основним металом або з його домішками. У дефекти типу мікропорожнеч дифундує як іонізований, так і атомарний водень, де він молізується, причому ця дифузія йде з нульовою концентрацією в мікропорожнечах [2].

Проникність водню в метал залежить від його розчинності і дифузії. Механічні напруження підсилюють проникність у пружній зоні. Спостерігається лінійна залежність між проникністю і напруженнями. В пластичній зоні ця залежність порушується і проникність зростає швидше, ніж напруження. Залежність проникності від напружень виявляється тим сильніше, чим менша пластичність металу [3, 10]. Згідно з сучасними виставами [1–8], водень тривалий час може знаходитися в сталі у вигляді іонів (протонів) і молекул. Невелика кількість водню в сталі не викликає помітних змін її властивостей. Підвищення концентрації водню в сталі вище за деяку межу, залежну від якості стали, змінює її фізичні і механічні властивості і може викликати появу дефектів, що впливають на міцність. Водень в сталі міняє її механічні властивості при короткочасному і тривалому статичному вантаженні, а також при повторно-змінному і ударному вантаженні [8, 9, 11–13] викликаючи водневе викришення поверхні [1, 11–13].

В даний час є велика кількість робіт з вивчення впливу водню на фізико-механічні властивості матеріалів і експлуатаційні характеристики конструкційних елементів [3–6, 9, 14]. Серед всіляких проявів дії водню на механічні властивості металів, особливе місце займає його вплив на тріщиностійкість. Дефекти абсолютно безпечні в звичайних умовах в результаті дії водню можуть стати небезпечними і привести до несподіваного крихкого руйнування виробу [5].

В монографій [5] узагальнений великий експериментальний матеріал по впливу водню на об'ємну міцність сталі, на підставі якого можна зробити наступні висновки: водень не робить великого впливу на пружні характеристики сталі, проте пластичні властивості (подовження і звуження) знижуються пропорційно зростанню концентрації водню аж до досягнення його концентрації 5 $см^3$/100 г; при подальшому збільшенні концентрації водню пластичність знижується на низькому рівні; інтенсивність окрихчування сталі під впливом водню залежить від обробки руйнівні напруження знижуються пропорційно зростанню концентрації водню; міра окрихчування сталі під впливом водню зменшується із збільшенням швидкості деформації і виявляється в інтервалі температур –100 – +100°С і найсильніше при нормальній температурі; вплив окрихчування виявляється за наявності розтягуючих напружень, типове для пластичної сталі в'язке руйнування у присутності водню стає крихким.

В роботах [2, 9] показано, що межа пропорційності в результаті високотемпературного наводнення знижується, причому тим більше, чим вищий вміст вуглецю в сталі. В разі зневуглецювання сталі навіть незначна концентрація водню в сталі призводить до різкого зниження пластичності і ударної в'язкості.

Середньолеговані сталі з 5–7% Cr і незначним вмістом Mo, W, V, Nb мають значно більшу водневу стійкість в порівнянні з низьколегованими сталями [2, 13].

На даний час в літературі мало робіт з впливу водню на метали та експлуатаційні характеристики конструкційних елементів з покриттями при циклічному навантаженні згином та контактному навантаженні при фретингу і тому такі дослідження є надзвичайно актуальними.

Мета і методи досліджень

Дослідження на багатоциклову та малоциклову втому і фретинг-втому при згині проводилися на сталях 20, 45, 45Х, 38Х2МЮА, що піддавалися іонному азотуванню за різними режимами в водневих і безводневих середовищах. Випробування проводилися на повітрі і в різних середовищах (кислих, лужних і нейтральних) на плоских і циліндричних зразках (рис. 1). Дослідження ставили за мету визначити вплив режимів іонного азотування на опір втомі різних сталей, що азотувалися та випробувалися в різних середовищах і за різних умов вантаження, і намітити шляхи підвищення їх довговічності.

Порівняльні випробування на багатоциклову втому гладких циліндрових зразків проводилися на машині ІМА-5 при чистому згині з обертанням (частота 50 Гц), в середовищі 3-відсоткового розчину NaCl і в повітрі. Зразки виготовлялися із сталі 20, частина з яких піддавалася іонному азотуванню у водневому (60 об. % N_2 + 40 об. % H_2) і безводневому (60 об. % N_2 + 40 об. % Ar) середовищах при постійності інших технологічних параметрів (T = 540°C, p = 80 Па, τ = 240 хв).

Випробування на багатоциклову втому з концентратором напружень проводилися на плоских зразках (рис. 1 б) із сталі 45Х на стенді з електромагнітним збудженням в ЕДС-200 при консольному згині зразка в одній площині в резонансі по першій формі коливань [15]. Концентратор напружень (нарізана до зміцнення канавка глибиною 1 мм з кутом розкриття 60° і радіусом при вершині 0,2 мм) мав ефективний коефіцієнт концентрації, розрахований по Нейберу, рівний 3,22. Випробування проводилися на повітрі і в кислому середовищі (буферний розчин лимонної кислоти 5 г/л і двозаміщеного фосфорнокислого натрію 10 г/л) pH 6,5 при частоті вантаження 350–400 Гц. За базу випробувань на повітрі і в кислому середовищі були прийняті відповідно 10^7 і $5 \cdot 10^7$ циклів вантажень. Дослідження припинялися при досягненні довжини тріщини 0,5 мм, яка фіксувалася за допомогою мікроскопа МБС-1 (х88).

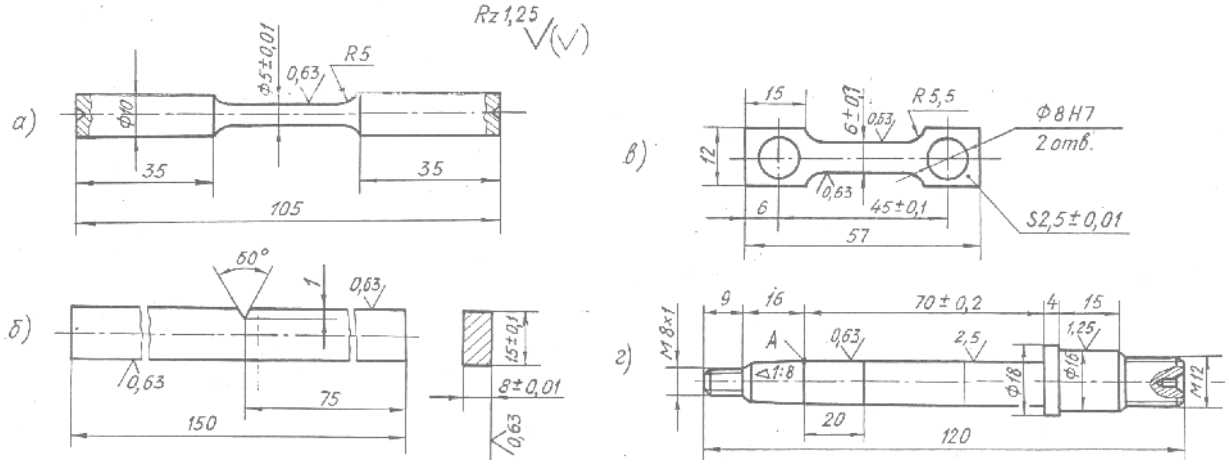


Рис. 1. **Зразки для випробувань на: а, б – багатоциклову втому; в – малоциклову втому; г – фретинг-втому**

Випробування на малоциклову втому проводилися на модернізованій установці ІП-2 [16], що дозволяє випробовувати плоскі зразки (рис. 1, в) чистим віднульовим згином при пружнопластичній деформації з частотою 23 цикла/хв. Зразки із сталей 20, 45, 45Х і 38ХМЮА випробовувалися в різних середовищах: кислому (буферному розчині лимонної кислоти і двозаміщеного фосфорнокислого натрію) pH 6,5, лужному (водний розчин оксиду кальцію) pH 13, нейтральному (конденсаті випарних апаратів) pH 7,0. Зразки перед азотуванням піддавалися нормалізації і поліпшенню. Фізико-механічні характеристики зразків до і після іонного азотування в безводневому (75 об. % N_2 + 25 об. % Ar) і водневому (75 об. % N_2 + 25 об. % H_2) середовищах і режимі іонного азотування (T = 560°C, p = 265 Па, τ = 4 год) приведені в таблиці 1.

Випробування на фретинг-втому проводилися на базі типової машини УКІ-10М, призначеної для випробувань на втому при консольному згині, із застосуванням спеціального пристрою (рис. 2), в якому випробовуваний зразок 1 закріплювався конічною частиною в контрзразок 2 гайками 5. У конічному з'єднанні створювався певний натяг за допомогою динамометричного ключа. Контрзразок 2 з'єднувався з тримачем 3, який кріпився в цанговому патронові установки УКІ-10М і здійснював обертальний рух. Пристрій навантаження 4 створював напруження згину в зразку з максимальним значенням в точці А, які викликали мікропереміщення в конічному з'єднанні. При обертанні зразка і дії навантаження Q в конічному з'єднанні матеріал отримує фретинг-втому.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики зразків до і після іонного азотування в безводневому (75 об. % N_2+25 об. % Ar) і водневому (75 об. % N_2+25 об. % H_2) середовищах за режимом T=560°C , p=265 Па, t=4 год

Марка сталі	Границя міцності $\sigma_в$, МПа			Відносне видовження δ, %			Відносне звуження ψ, %			Питома робота деформації А, кН·м/м^3		
	ОТ ОВ	Азотування		ОТ ОВ	Азотування		ОТ ОВ	Азотування		ОТ ОВ	Азотування	
20	385	493	498	21	15	10	55	39	26	65	59	40
45	580	668	675	15	11	8,5	43	32	21	72	61	42
45Х	1020	1103	1112	10	6	5	51	26	20	89	51	48
38ХМЮА	1051	1182	1191	9	5	4,7	42	22	19	86	53	51

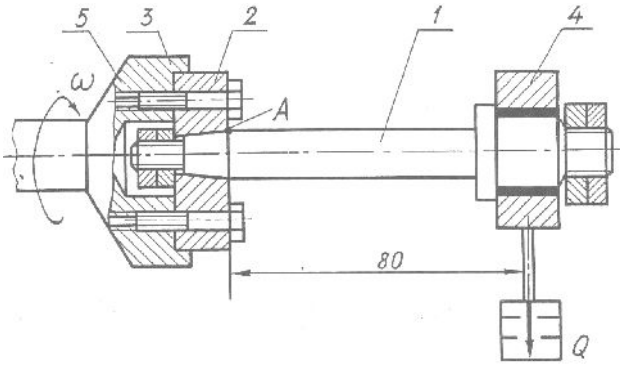


Рис. 2. Схема випробувань на фретинг-втому: 1 – зразок, 2 – контрзразок, 3 – тримач, 4 – навантажувальний пристрій

Критерієм оцінки фретинг-втоми служило число циклів навантаження до руйнування зразка. За базове число циклів прийнято число циклів навантаження зразка, виготовленого з не азотованої сталі 40Х і встановленого в контрзразок із сталі 35Л. Випробування проводилися на повітрі при частоті обертання зразка 6000 об/хв, навантаженні Q = 392 Н, моменті затягування гайки кріплення зразка 20–25 Н·м, максимальному напруженні згину 210 МПа. Биття зразка в місці прикладання навантаження Q складало 0,05–0,15 мм и контролювалося індикатором.

Результати експериментальних досліджень

Як показали випробування (рис. 3) межа витривалості зразків із сталі 45Х в результаті іонного азотування в безводневому середовищі підвищилася на 37% при випробуваннях в повітрі і на 31% при випробуваннях в кислому середовищі в порівнянні з неазотованими зразками після покращення. Однією з основних причин такого підвищення межі витривалості окрім зміцнювальної дії покриття є значні залишкові напруження стиску [10], що виникають в азотованому шарі, які разом з покриттям перешкоджають руху дислокацій до поверхні і тим самим уповільнюють зростання мікротріщин. Зразки, що азотувалися в водневому середовищі за аналогічним режимом, показали меншу витривалість на повітрі на 28%, а в кислому середовищі на 21% в порівнянні з азотованими зразками в безводневому середовищі.

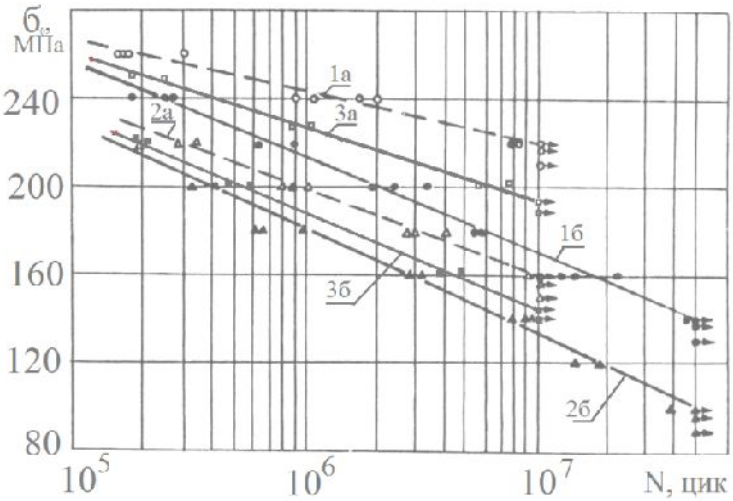


Рис. 3. **Криві втоми плоских зразків с надрізом із сталі 45Х: 1 – азотованих в безводневому середовищі (75 об. % N_2 + 25 об.** % **Ar) за режимом: T = 570°C,** p = 265 **Па,** τ = 240 **хв; 2 – покращених; 3 – азотованих в водневому середовищі (75 об. % N_2 + 25 об.** % **H_2) за аналогічним режимом; а – на повітрі; б – в кислому середовищі** (pH 6,5)

В таблиці 2 приведені результати випробувань на малоциклову втому неазотованих і азотованих зразків з яких видно, що в досліджуваному діапазоні зміни амплітуд повної деформації (ε= 0,5–4,0 %), довговічність зразків знаходиться в межах 102–105 циклів до руйнування, а її зв'язок з ε є прямою лінією в подвійних логарифмічних координатах при випробуваннях різних матеріалів в різних середовищах. Дослідження показали, що при деформаціях ε > 0,3 % довговічність азотованих зразків нижча, ніж для не азотованих для всіх сталей (рис. 3), причому, це зниження тим більше, чим менші пластичні властивості сталі (табл. 1) і більше ε (табл. 2). Дане положення є загальною закономірністю при малоцикловій втомі сталей.

Таблиця 2

Результати випробувань на малоциклову втому в кислому середовищі зразків з різних сталей до і після іонного азотування в безводневому (75 об. % N_2+25 об. % Ar) і водневому (75 об. % N_2+25 об. % H_2) середовищах за режимом T=560°C, p=265 Па, t=4 год

Відносна деформація ε, %	Сталь 45Х			38ХМЮА		
	Не азотований	Іонне азотування		Не азотований	Іонне азотування	
		Безводневе середовище	Водневе середовище		Безводневе середовище	Водневе середовище
0,25	$3,5\cdot10^4$	$4,2\cdot10^5$	$3,8\cdot10^5$	$1,5\cdot10^4$	$1,7\cdot10^5$	$1,4\cdot10^5$
0,5	$4,5\cdot10^4$	$3,0\cdot10^4$	$2,3\cdot10^4$	$3,2\cdot10^4$	$1,3\cdot10^4$	$1,05\cdot10^4$
0,75	$1,3\cdot10^4$	$7,0\cdot10^3$	$6,0\cdot10^3$	$1,03\cdot10^4$	$5,6\cdot10^3$	$1,4\cdot10^3$
1,0	$7,5\cdot10^3$	$2,6\cdot10^3$	$2,0\cdot10^3$	$5,2\cdot10^3$	$1,85\cdot10^3$	$1,13\cdot10^3$
1,5	$1,26\cdot10^3$	$0,6\cdot10^3$	$0,5\cdot10^3$	$1,2\cdot10^3$	$0,45\cdot10^3$	$0,4\cdot10^3$
2,0	$1,05\cdot10^3$	$0,23\cdot10^3$	$0,22\cdot10^3$	$1,0\cdot10^3$	$0,19\cdot10^3$	$0,16\cdot10^3$
2,5	$0,75\cdot10^3$	$0,35\cdot10^2$	$0,25\cdot10^2$	$0,6\cdot10^3$	$0,3\cdot10^2$	$0,2\cdot10^2$
3,0	$0,45\cdot10^3$	–	–	$0,4\cdot10^3$	–	–
4,0	$1,5\cdot10^2$	–	–	$0,11\cdot10^3$	–	–
ε, %	Сталь 45			Сталь 20		
0,25	$6,0\cdot10^4$	$7,1\cdot10^4$	$4,8\cdot10^4$	$2,5\cdot10^4$	$2,7\cdot10^4$	$1,6\cdot10^4$
0,5	$1,1\cdot10^4$	$0,9\cdot10^4$	$0,68\cdot10^4$	$7,0\cdot10^3$	$3,6\cdot10^3$	$2,5\cdot10^3$
0,75	$0,6\cdot10^4$	$3,0\cdot10^3$	$1,25\cdot10^3$	$3,5\cdot10^3$	$1,7\cdot10^3$	$1,9\cdot10^3$
1,0	$3,5\cdot10^3$	$1,07\cdot10^3$	$1,02\cdot10^3$	$2,2\cdot10^3$	$0,9\cdot10^3$	$0,7\cdot10^3$
1,5	$1,19\cdot10^3$	$0,4\cdot10^3$	$0,37\cdot10^3$	$1,0\cdot10^3$	$0,33\cdot10^3$	$0,28\cdot10^3$
2,0	$0,83\cdot10^3$	$0,18\cdot10^3$	$0,14\cdot10^3$	$0,6\cdot10^3$	$0,18\cdot10^3$	$0,12\cdot10^3$
2,5	$0,55\cdot10^3$	$0,18\cdot10^2$	$0,15\cdot10^2$	$0,45\cdot10^3$	$0,1\cdot10^2$	$0,08\cdot10^2$
3,0	$0,35\cdot10^3$	–	–	$0,3\cdot10^3$	–	–
4,0	$0,1\cdot10^3$	–	–	$0,9\cdot10^2$	–	–

З таблиці 2 видно, що малоциклова витривалість всіх досліджуваних сталей після іонного азотування в водневомісткому середовищі значно нижча в порівняні з її значенням при азотуванні в безводневому середовищі і при відносній деформації ε = 0,25 % ця різниця коливається від 10% для сталі 38ХМЮА до 68 % для сталі 20. Це пояснюється шкідливим впливом водню на пластичні властивості сталей, які збільшуються із зменшенням легованості сталі [5]. Така ж закономірність при випробуваннях на мало циклову втома має місце і в інших середовищах.

Корозійне середовище істотніше зменшує малоциклову втому сталей з вищою міцністю [14]. При однакових деформаціях в сталях більшої міцності виникають вищі напруження, які сприяють прискоренню корозійних процесів у вершинах тріщин. Азотування підвищує характеристики міцності сталей. Тому при високих рівнях деформації азотовані стали 45 і 20 мають більшу довговічність при випробуваннях на малоциклову втому в порівнянні з азотованими сталями 45Х і 38ХМЮА (табл. 2).

Дослідження малоциклової втоми стали 45Х в різних середовищах показали, що різні середовища по-різному впливають на довговічність зразків в залежності від величини деформації. При відносних деформаціях ε >0,75 % (табл. 3) число циклів до руйнування азотованих і незміцнених зразків в лужному середовищі вище, ніж на повітрі, нейтральному і кислому середовищах.

Це пояснюється тим, що при випробуваннях в лужному середовищі на поверхні зразків утворюється гідрооксидний шар, який утрудняє доступ кисню в зону деформації [17], що сприяє підвищенню довговічності сталі при малоцикловій втомі. Значне електрохімічне розчинення сталей в кислому середовищі створює умови для інтенсивного утворення концентраторів напружень, що знижує втомну міцність сталей. У нейтральному середовищі, що має меншу корозійну активність, малоциклова довговічність азотованої і неазотованої сталі 45Х вища в порівняні з кислим середовищем. Із збільшенням амплітуди циклічної деформації вплив агресивності середовища на малоциклову втому зменшується та збільшується роль пластичної деформації і при ε ≈ 0,75 % для азотованих і при ε ≈ 4 % для неазотованих зразків їх втомна довговічність на повітрі і в корозійних середовищах збігаються (табл. 3).

Таблиця 3

Результати випробувань на малоциклову втому зразків із сталі 45Х на повітрі, в лужному, нейтральному та кислому середовищах до і після іонного азотування в безводневому (75 об. % Ar+25 об. % N_2) і водневому (75 об. % H_2+25 об. % N_2) середовищах за режимом T=520°C, p = 240Па, t=4 год

Відносна деформація ε, %	Лужне середовище			На повітрі		
	Не азотований	Азотування		Не азотований	Азотування	
		Безводневе	Водневомістке		Безводневе	Водневомістке
0,25	28510	31420	28130	20310	22015	19620
0,5	8130	5740	4150	6920	5330	4450
0,75	3810	2330	2070	3540	2250	1910
1,0	2250	1500	1350	2050	1450	1230
1,5	1050	580	520	900	480	625
2,0	630	450	410	620	350	305
2,5	450	310	270	440	230	210
3,0	320	220	190	310	170	145
4,0	210	150	135	206	95	80

Результати випробувань на малоциклову втому при згині зразків зі сталі 45Х (табл. 3) показують, що при азотуванні в водневому середовищі їх довговічність значно нижча в порівнянні з азотуванням в безводневому насичуючому середовищі, а саме: в лужному середовищі на 10–13%, на повітрі і нейтральному середовищах – на 15–20% і в кислому середовищі – на 25%.

На основі проведених досліджень впливу технологічних параметрів іонного азотування в безводневих середовищах на фретинг-втому [9] було визначено оптимальний режим іонного азотування (T = 540°C; p = 320Па; τ = 150 хв; середовище 62 об %N_2+38 об % Ar.) за критерієм максимальної довговічності. Даний режим забезпечує максимальну довговічність зразків при випробуваннях на фретинг-втому (N = $46{,}8\cdot10^6$ циклів), що перевищує в 20 разів довговічність неазотованих зразків. При цьому азотований шар має глибину h = 256 мкм, глибину нітридної зони h_1 = 4 мкм, мікротвердість поверхні H_{100} = 7230 МПа і фазовий склад поверхневого шару 20 % ε + 55 %25 % $\alpha Fe_{[N)}$.

З метою визначення впливу водню на довговічність сталі 40Х при фретинг-втомі проведені порівняльні випробування зразків після іонного азотуванні в водневому середовищі (62 об %N_2+38 об % H_2) при зазначеному вище значенні у інших технологічних параметрів оптимального режиму азотування. Умови випробувань були ідентичними умовам випробувань зразків, що азотувалися в безводневих середовищах за оптимальним режимом. Мікроструктурними та рентген-структурними дослідженнями визначено, що товщина азотованого шару h = 280 мкм, товщину нітридної зони h_1 = 6 мкм, мікротвердість поверхні H_{100} = 9670 МПа і фазовий склад поверхневого шару 80 % ε + 20 % γ'. Випробування показали. що довговічність цих зразків на 62% нижча в порівнянні з зразками, що азотувалися в безводневому середовищі. Причинами такого зменшення довговічності зразків є водневе окрихчення металу в зв'язку з наявністю водню в насичуючому середовищі та утворенні великої кількості твердої і крихкої ε-фази.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження показали велику ефективність технології іонного азотування в безводневих середовищах при підвищенні втомної витривалості сталей при згині та фретингу. Іонне азотування в водневих середовищах викликає суттєве зменшення втомної витривалості сталей в усіх досліджуваних середовищах в зв'язку водневою крихкістю металу.

При багато цикловій втомі зразки, що азотувалися в водневому середовищі, показали меншу витривалість на повітрі на 28%, а в кислому середовищі на 21% в порівнянні з азотованими зразками, що азотувалися в безводневому середовищі за аналогічними режимами.

Дослідження малоциклової втоми сталей при випробуваннях в різних середовищах показали, що застосування азотування при відносних деформації ε > 0,3 % в безводневих середовищах і ε > 0,2 % в водневомістких середовищах є недоцільним, оскільки довговічність сталей нижча в порівнянні з її значенням для неазотованих сталей.

Порівняльні випробування зразків на фретинг зі згином після іонного азотування в водневому середовищі (62 об %N_2+38 об % H_2) при оптимальному режимі азотування мали довговічність на 62% нижчу в порівнянні з зразками, що азотувалися в безводневому середовищі. Причинами такого зменшення довговічності зразків є водневе окрихчення металу та утворенні великої кількості твердої і крихкої ε-фази в поверхневому шарі.

Література

1. Водород в металлах / под ред. Г. Альфельда и И. Фелькля. – М. : Мир, 1981. – 380 с.
2. Арчаков Ю.И. Водородоустойчивость стали / Арчаков Ю.И. – М. : Металлургия, 1978. – 150 с.
3. Карпенко Г.В. Влияние водорода на свойства стали / Карпенко Г.В., Крипякевич Р.Н. – М. : Металлургиздат, 1962. – 196 с.
4. Похмурський В.І. Федоров В. В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах / Похмурський

В.І., Федоров В.В. – Львів : Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1998. – 238 с.

5. Механика разрушения и прочность металлов : справ. пособие : в 4 т. Т. 1: Основы механики разрушения / под общ. ред. В.В. Панасюка. – К. : Наук. думка, 1988. – 488 с.

6. Карпенко Г. В. Физико-химическая механика конструкционных метал лов : в 2 т. / Г. В. Карпенко // Избр. труды. – К. : Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 228 с.

7. Балицький О. І. Оцінювання впливу водню на механічні характеристики складно легованого нікелевого сплаву / О. І. Балицький, В. М. Мочульський, Л. М. Іваськевич // Физ.-хим. мех. Материалов. – 2015. – № 4. – С. 91–100.

8. Коттрелл П. Водородная хрупкость металлов / Коттрелл П. – М. : Металлургиздат, 1963. – 117 с.

9. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В.Г. Каплун, П.В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 344 с.

10. Каплун П.В. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування за показниками мікротвердості / П.В. Каплун, Б.А. Ляшенко// Проблемы прочности. – 2016. – № 6. – С. 56–63.

11. Калачев В. А. Водородная хрупкость метал лов / В. А. Калачев. – М. : Металлургия, 1985. – 217 с.

12. Гельд П. В. Водород и физические свойства металлов и сплавов / П. В. Гельд, Р. А. Рябов, Л. П. Мохрачева. – М. : Наука, 1985. – 232 с.

13. Мороз Л.С. Водородная хрупкость металлов / Мороз Л.С., Чечулин Б.В. – М. : Металлургия, 1967. – 255 с.

14. Карпенко Г. В. Влияние структуры сталей на их малоцикловую усталость в атмосфере водорода / Г. В. Карпенко, А. Н. Романив, В. И. Ткачев // Докл. АН УССР. – 1974. – Т. 214. – № 2. – С. 312–314.

15. Прокопенко А.В. Методика испытаний компрессорных лопаток ГТД на усталость в коррозионной среде / А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов // Проблемы прочности. – 1980. – № 4. – С. 107–109.

16. Ткачев В.И. Машина ИП–2 для испытаний металлов на малоцикловую усталость в жидких средах / В.И. Ткачев, Ю.И. Бабей // Физико-химическая механика материалов. – 1966. – № 2. – С. 228–229.

17. Улиг Г. Коррозия метал лов / Улиг Г. – Металлургия, 1968. – 308 с.

References

1. Vodorod v metallakh / pod red. H. Alfelda y Y. Felklia. – M. : Myr, 1981. – 380 s.

2. Archakov Yu.Y. Vodorodoustoichyvost staly / Archakov Yu.Y. – M. : Metallurhyia, 1978. – 150 s.

3. Karpenko H.V. Vlyianye vodoroda na svoistva staly / Karpenko H.V., Krypiakevych R.N. – M. : Metallurhyzdat, 1962. – 196 s.

4. Pokhmurskyi V.I. Fedorov V. V. Vplyv vodniu na dyfuziini protsesy v metalakh / Pokhmurskyi V.I., Fedorov V.V. – Lviv : Fiz.-mekh. in-t im. H. V. Karpenka NAN Ukrainy, 1998. – 238 s.

5. Mekhanyka razrushenyia y prochnost metallov : sprav. posobye : v 4 t. T. 1: Osnovy mekhanyky razrushenyia / pod obshch. red. V.V. Panasiuka. – K. : Nauk. dumka, 1988. – 488 s.

6. Karpenko H. V. Fyzyko-khymycheskaia mekhanyka konstruktsyonnykh metal lov : v 2 t. / H. V. Karpenko // Yzbr. trudы. – K. : Nauk. dumka, 1985. – T. 1. – 228 s.

7. Balytskyi O. I. Otsiniuvannia vplyvu vodniu na mekhanichni kharakterystyky skladno lehovanoho nikelevoho splavu / O. I. Balytskyi, V. M. Mochulskyi, L. M. Ivaskevych // Fyz.-khym. mekh. Materyalov. – 2015. – # 4. – S. 91–100.

8. Kottrell P. Vodorodnaia khrupkost metallov / Kottrell P. – M. : Metallurhyzdat, 1963. – 117 s.

9. Kaplun V.H. Yonnoe azotyrovanye v bezvodorodnykh sredakh / V.H. Kaplun, P.V. Kaplun. – Khmelnytskyi : KhNU, 2015. – 344 s.

10. Kaplun P.V. Vyznachennia zalyshkovykh napruzhen v azotovanykh sharakh pislia ionnoho azotuvannia za pokaznykamy mikrotverdosti / P.V. Kaplun, B.A. Liashenko// Problemy prochnosty. – 2016. – # 6. – S. 56–63.

11. Kalachev V. A. Vodorodnaia khrupkost metal lov / V. A. Kalachev. – M. : Metallurhyia, 1985. – 217 s.

12. Held P. V. Vodorod y fyzycheskye svoistva metallov y splavov / P. V. Held, R. A. Riabov, L. P. Mokhracheva. – M. : Nauka, 1985. – 232 s.

13. Moroz L.S. Vodorodnaia khrupkost metallov / Moroz L.S., Chechulyn B.V. – M. : Metallurhyia, 1967. – 255 s.

14. Karpenko H. V. Vlyianye struktury stalei na ykh malotsyklovuiu ustalost v atmosfere vodoroda / H. V. Karpenko, A. N. Romanyv, V. Y. Tkachev // Dokl. AN USSR. – 1974. – T. 214. – # 2. – S. 312–314.

15. Prokopenko A.V. Metodyka yspytanyi kompressornыkh lopatok HTD na ustalost v korrozyonnoi srede / A.V. Prokopenko, V.N. Torhov // Problemy prochnosty. – 1980. – # 4. – S. 107–109.

16. Tkachev V.Y. Mashyna YP–2 dlia yspыtanyi metallov na malotsyklovuiu ustalost v zhydkykh sredakh / V.Y. Tkachev, Yu.Y. Babei // Fyzyko-khymycheskaia mekhanyka materyalov. – 1966. – # 2. – S. 228–229.

17. Ulyh H. Korrozyia metal lov / Ulyh H. – Metallurhyia, 1968. – 308 s.

Рецензія/Peer review : 16.06.2017 р. Надрукована/Printed :25.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф..Киницький Я.Т.

УДК 621.825.7

І.І. СИДОРЕНКО, В.О. КУРГАН
Одеський національний політехнічний університет

СИНТЕЗ ЦІЛЬОВОЇ ПРУЖНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БАЗІ ПРУЖНОЇ МУФТИ З НЕЛІНІЙНИМ МЕХАНІЧНИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Інтенсифікація технологічних процесів, застосування високопродуктивних машин та використання технологій на основі коливань призводить до того, що сучасне обладнання та агрегати працюють у широкому діапазоні навантажень, амплітуд і частот коливань, викликаних гармонійним, ударним або зовнішнім впливом. На підставі цього, враховуючи недосконалість сучасних пружних муфт, запропоновано розробити нові конструкції з розширеними можливостями з протидії крутильним коливанням у технічній системі.

У дійсний час, враховуючи наукові розробки, усі конструкції пружних муфт можна умовно розбити на так звані базові структури, де керування жорсткості відбувається за рахунок конструктивних параметрів. У зв'язку з цим, було запропоновано до існуючої базової структури додати систему керування у вигляді механічного зворотного зв'язку та перевірити можливість щодо відтворення пружною муфтою цільової пружної характеристики.

У роботі розглянута перспективна конструкція пружної муфти з нелінійним механічним зворотним зв'язком. Розроблена її розрахункова схема, яка враховує голономні зв'язки в її структурі та визначені головні геометричні параметри, які обумовлюють пружну характеристику. На базі розрахункової схеми, отримані вирази, які описують пружну характеристику муфти. Проведено низку розрахунків для оцінювання можливостей розглянутого пристрою по відтворенню нелінійних пружних характеристик. З метою визначення взаємозв'язку між кривизною ділянок функції управління і відповідних ділянок пружної характеристики застосовано функцію управління, що була задана у вигляді ступеневого полінома. Проведено графічну інтерпретацію розрахунків, яка показала можливість відтворення комбінованої пружної характеристики з ділянкою тимчасової втрати навантажувальної здатності. На підставі отриманих результатів, визначені вихідні параметри і прорахована цільова пружна характеристика з двома ділянками тимчасової втрати навантажувальної здатності. Проведена графічна інтерпретація показала, що представлена пружна муфта реалізовує прораховану пружну характеристику. Встановлено корегувальний параметр для запобігання заклинювання механізму при використанні складних профілів керуючої ланки.

Проведені дослідження показали, що введений у конструкцію муфти нелінійний механічний зв'язок значно розширює функціональні можливості пристрою до відтворення цільової пружної характеристики.

Ключові слова: пружна муфта, механічний зворотний зв'язок, пружна характеристика.

I.I. SYDORENKO, V.O. KURGAN
Odessa National Polytechnic University

SYNTHESIS OF TARGET ELASTIC CHARACTERISTIC ON THE BASIS OF ELASTIC CLUTCH WITH NONLINEAR MECHANICAL FEEDBACK

The intensification of technological processes, the use of high-performance machines and the use of oscillation technologies lead to the fact that modern equipment and units operate in a wide range of loads, amplitudes and frequencies of oscillations caused by harmonious, shock or external influences. On this basis of, taking into account the imperfections of modern elastic clutches, it is proposed to develop new structures with enhanced capabilities to counteract torsional fluctuations in the technical system. In real time, taking into account scientific developments, all designs of elastic clutches can be conditionally divided into so-called basic structures, where hardness control is due to constructive parameters. In this regard, it was suggested to add a control system in the form of a mechanical feedback to the existing base structure and to check the possibility of reproducing of the target elastic characteristic by the elastic clutch. The perspective design of elastic clutch with nonlinear mechanical feedback was considered in this article. Its calculation scheme, which takes into account the holonomic connections in its structure, was constructed and the main geometric parameters that stipulate the elastic characteristic were determined. On the basis of the calculation scheme, we have obtained the expressions that describe the elastic characteristic of the clutch. A number of calculations have been carried out to evaluate the possibilities of the considered device for reproduction of nonlinear elastic characteristics. In order to determine the relationship between the curvature of the sections of the control function and the corresponding parts of the elastic characteristic, the control function as a stepped polynomial was applied. A graphical interpretation of calculations was conducted, which showed the possibility of reproduction of a combined elastic characteristic with a site of temporary loss of load capacity. Based on the obtained results, the initial parameters were determined and the target elastic characteristic was calculated with two sections of temporary loss of load capacity. This graphical interpretation showed that the presented elastic clutch realizes the calculated elastic characteristic. The correction parameter was set to prevent jamming of the mechanism in using of complex profiles of management link*. The conducted studies have shown that the nonlinear mechanical coupling which was introduced into the clutch design significantly extends the functionality of the device for the reproduction of the target elastic characteristic.*

Key words: elastic clutch, mechanical feedback, elastic characteristic.

Постановка задачі

В сучасному машинобудуванні широке розповсюдження отримали пружні муфти з металевими пружними елементами. Цьому сприяє здатність даних пристроїв не тільки передавати крутний момент, а і запобігати негативним проявам коливань у технічній системі. При дослідженнях з використанням математичних моделей встановлено, що найбільш позитивні результати показують ПМ з нелінійною пружною характеристикою [1, 2]. Однак, вже створені пружні муфти, не в повному обсязі відповідають заявленим вимогам, що пов'язано з їх вузьким робочим діапазоном [3]. А створені перспективні конструкції

ПМ, що реалізують нелінійну пружну характеристику, не мають широкого використання через малу кількість їх реальних механічних конструкцій. На підставі цього актуальною задачею уявляється розробка і дослідження нових конструкцій ПМ, що реалізують цільову нелінійну пружну характеристику.

Аналіз досліджень і публікацій

Попередньо проведені дослідження, що мали за мету створення нових пасивних ПМ з нелінійним механічним зворотним зв'язком, проводились з використанням теорії модифікованих кінематичних графів [4]. Результатами цих досліджень є синтезована графова модель пристрою з додатковим механічним контуром. Розробка отриманої моделі дозволила відтворити кінематичну схему, відповідно до якої створено реальну конструкцію ПМ з механічним зворотним зв'язком у вигляді кулачкового механізму з кінематичним замиканням. В залежності від конструктивного компонування пристрій реалізує нелінійні пружні характеристики Дюффінговського типу "м'якого" і "жорсткого" видів, що дає підґрунтя для відтворення конструкцією комбінованої пружної характеристики. Такий види пружної характеристики дає можливість проходження резонансу "стрибком", без виходу на резонансні амплітуди. Але це можливо лише при наявності на пружній характеристиці ділянок з квазінульовою жорсткістю в робочому діапазоні переміщень.

Виділення невирішених частин

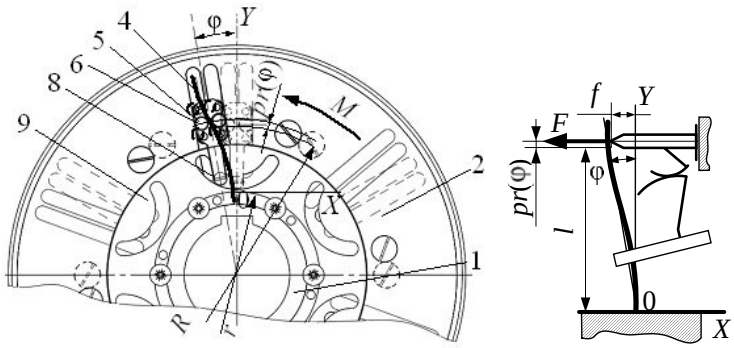
Таким чином, невирішеною задачею є подолання ПМ резонансу "стрибком" у прямому і зворотному напрямках. Цю проблему можливо вирішити тільки за умови, що пружна характеристика муфти буде комбінованого виду, а саме на ній повинні бути ділянки що відповідають характеристикам "м'якого" і "жорсткого" видів, також обов'язкова наявність ділянок з квазінульовою жорсткістю.

Формулювання цілей

Ціллю проведених досліджень є: дослідження функціональних можливостей синтезованої пасивної пружної муфти з додатковим механічним контуром у вигляді кулачкового механізму з кінематичним замиканням по відтворенню визначеної (цільової) пружної характеристики; визначення основних конструкційних параметрів, які впливають на вид пружної характеристики; розрахунок параметрів алгоритму управління та перевірка можливості його технічного відтворення додатковим механічним контуром запропонованої конструкції.

Теоретичні дослідження

Розглянемо перспективну конструкцію пружної муфти з нелінійним механічним зворотним зв'язком. Для складання розрахункової схеми проаналізуємо функціональну взаємодію між елементами ПМ в процесі роботи (рис. 1). Дія обертального моменту на рушійну напівмуту 1, призводить до обертання відносно неї на деякий кут φ веденої напівмуфти 2, що обумовлено деформацією (згином) плоскої пружини 4. Деформація плоскої пружини 4 виникає в наслідок того, що навантажувальні ролики 5 штовхача 6 контактують з вільним кінцем плоскої пружини 4, другий кінець якої консольно закріплений на напівмуфті 1, а напрямні ролики 7 штовхача 6 контактують з радіальними проточками напівмуфти 2. Контакт ролика опорного 8 штовхача 6 з поверхнею криволінійного пазу диску 9 викликає радіальне переміщення штовхача 6 $x(\varphi)$ вздовж радіальних проточок напівмуфти 2. Величина і напрямок радіального переміщення штовхача 6, обумовлені формою криволінійного пазу диску 9 і відображають переміщення контактної лінії прикладання навантаження від навантажувальних роликів 5 до консольно закріпленої плоскої пружини 4.



а) б)

Рис. 1. Розрахункова схема пружної муфти з нелінійним механічним зворотним зв'язком: загальна (а); спрощена (б)

Зважаючи на наявність голономних зв'язків між елементами пристрою доцільно ввести у розрахункову схему систему координат $X0Y$, розмістивши її так, що точка 0 лежить на місці консольного закріплення пружного елементу на напівмуфті 1 (рис. 1, а). При обраній системі координат основні геометричні параметри пристрою у початковий момент часу, а саме радіус R контакту роликів 5 і пружного елементу 4, а також радіус r, що обумовлює консольне закріплення пружного елементу 4 на напівмуфті 1 визначають головний геометричний розмір (параметр) який обумовлює пружну характеристику муфти. Цей головний параметр уявляє собою довжину пружного елементу, який підлягає згину

$$l = R - r \tag{1}$$

Для визначення пружних характеристик пристрою наведена розрахункова схема може бути дещо спрощена (рис. 1, б).

Тангенс кута закручування φ напівмуфт однієї відносно іншої, залежить в першу чергу від величини прогину f (або кута згину пружного елементу $\varphi_п$) пружних елементів 4 віднесеної до відстані між лінією контакту пружного елементу з роликом 5 та віссю обертання пружної муфти R. З деяким припущенням вважають, що проекція переміщення Δl_y незначна, звідки прийняті припущення

$$\varphi_п \approx f, \quad \text{tg}\,\varphi = \frac{\varphi_п}{R} \approx \varphi. \tag{2}$$

З урахуванням виразу, що обумовлює прогин консольно закріпленого пружного елементу під дією сили, лінія дії якої перпендикулярна вісі пружного елементу отримано

$$\varphi = \frac{Fl^3}{3nEJ_xR} = \frac{Ml^3}{3nEJ_xR^2}, \tag{3}$$

де $F = M/R$ – сила, що визначає дію обертального моменту M і призводить до згину пружного елементу;

l – плече прикладання навантаження до пружного елементу, за виразом (1);

n – кількість пружних елементів у муфті;

E – модуль пружності матеріалу пружних елементів, за умови, що усі елементи виконані з одного матеріалу;

J_x – момент інерції перерізу пружного елементу, за умови що усі перерізи пружних елементів мають однакові форму та розміри.

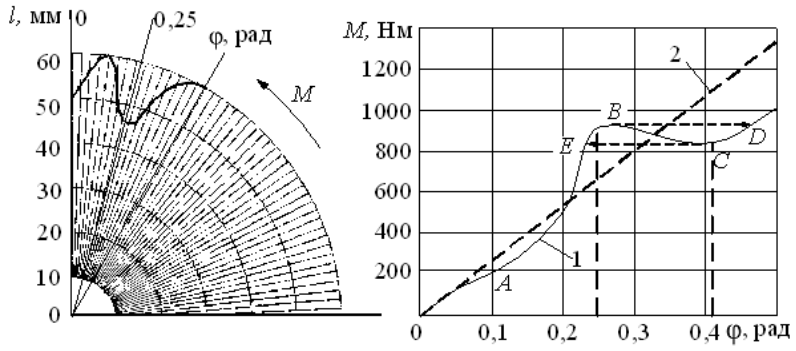
На основі визначеної розрахункової схеми та з урахуванням наявності додаткової механічної структури вираз, який обумовлює регульовану пружну характеристику запропонованої муфти може бути отриманий на основі виразу (5) і має вигляд

$$M(\varphi) = \frac{3nEJ_x(R \pm pr(\varphi))^2}{(l \pm pr(\varphi))^3}\ \varphi. \tag{4}$$

Для оцінювання можливостей розглянутого пристрою відносно відтворення пружних характеристик проведено низку розрахунків, за виразом (5). Для спрощення вважалося, що пристрій має один пружний елемент, виконаний зі сталі 65 (ГОСТ 14959-79) з модулем пружності $E = 2{,}15\times 10^{-5}$ МПа; параметр $l = 50$ мм; параметр $R = 80$ мм; форма перетину пружного елементу – прямокутник $h\times b = 10\times 1$ мм; максимальний кут закручування напівмуфт за конструктивними параметрами $\varphi = 0{,}5$ рад (30°).

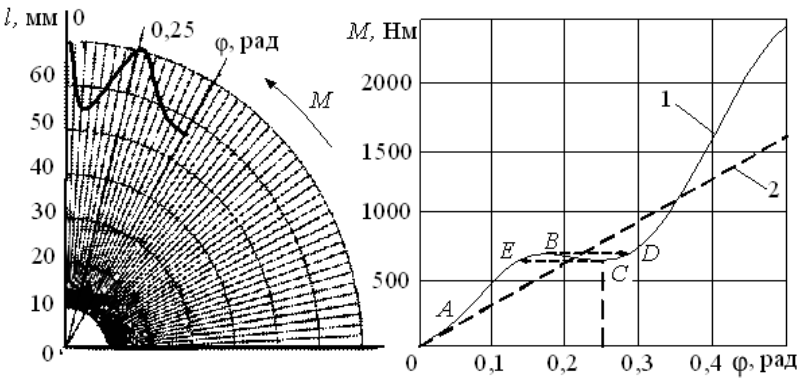
З метою визначення взаємозв'язку між кривизною ділянок функції управління і відповідних ділянок пружної характеристики застосовано функцію управління, що була задана у вигляді ступеневого полінома

$$pr(\varphi) = 241144\varphi^6 - 394025\varphi^5 + 236937\varphi^4 - 62701\varphi^3 + 6639{,}4\varphi^2 - 154\varphi + 0{,}33. \tag{5}$$



а) б)

Рис. 2. Аналіз пружних характеристик муфти з нелінійним зворотним зв'язком: радіальний графік зміни плеча навантаження l + pr(φ) пружного елементу (а); пружна характеристика (б)



а) б)

Рис. 3. Аналіз пружних характеристик муфти з нелінійним зворотним зв'язком: радіальний графік зміни плеча навантаження l - pr(φ) пружного елементу (а); пружна характеристика (б)

У першому розрахунковому випадку функція управління визначала зміну плеча прикладання навантаження до пружного елементу при обертанні напівмуфт одна відносно іншої на позитивну (збільшення знаменника і чисельника на + $pr(\varphi)$ у виразі 4) величину функції управління (рис. 2, а) Функція управління обумовлює три екстремуми, які визначають l_1=60 мм при φ = 0,125 рад, l_2=47 мм при φ = 0,25 рад, l_3=50 мм при φ = 0,45 рад.

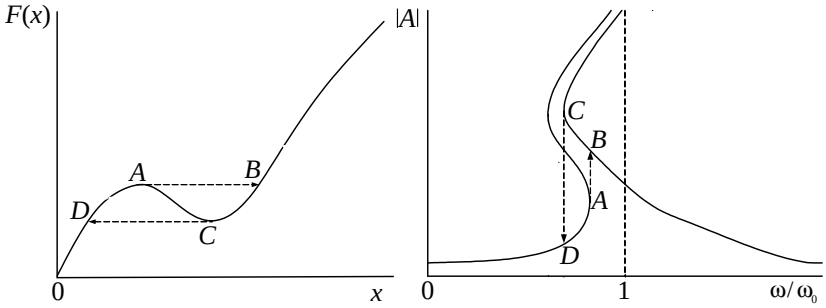
У другому розрахунковому випадку функція управління визначала зміну плеча прикладання навантаження до пружного елементу при обертанні напівмуфт одна відносно іншої на від'ємну (зменшення знаменника і чисельника на – $pr(\varphi)$ у виразі 4) величину функції управління (рис. 3, а). Функція управління обумовлює три екстремуми, які визначають l_1=70 мм при φ = 0,125 рад, l_2=55 мм при φ = 0,25 рад, l_3=70 мм при φ = 0,45 рад.

Графічна інтерпретація проведених розрахунків показує, що характеристики у обох випадках (рис. 2, б та рис. 3, б) на всьому діапазоні кута закручування

напівмут є нелінійними. Обидві пружні характеристики складаються з ділянок різної нелінійності, тому їх можна вважати комбінованими. На цих ділянках визначено значне збільшення деформації при незначному збільшенні або зменшенні навантаження (відповідно ділянки *BD* і *CE*, див. рис. 2, б та рис. 3, б). Пружні системи з таким характеристиками називають системами з "тимчасової втратою навантажувальної здатності". Теоретично та експериментально доведено, що саме такі системи забезпечують прохід резонансу стрибком у прямому та зворотному напрямку [5].

Слід зазначити, що у обох розглянутих розрахункових випадках точки перегину пружної характеристики, що обумовлюють відповідні ділянки на ній, точно відповідають екстремумам функції управління. Це свідчить про те, що запропонована пружна муфта з механічним зворотним зв'язком чутлива до налаштувань зворотного зв'язку, оскільки кожну ділянку її пружної характеристики можна реалізувати окремо, посиливши або, навпаки, послабивши прояв відповідних геометричних параметрів, а саме форму кривизни криволінійного пазу, який обумовлює алгоритм управління.

На підставі отриманих результатів, доцільно прорахувати можливість відтворення, запропонованою ПМ, цільової пружної характеристики.



а) б)

Рис. 4. Пряме і зворотне подолання резонансу "стрибком" у нелінійній пружній системі: пружна характеристика з однією ділянкою втрати навантажувальної здатності (а); амплітудно-частотна характеристика системи (б)

При виборі цільової пружної характеристики узяте до уваги те, що у випадку реалізації пружною системою комбінованої пружної характеристики з ділянкою "втрати навантажувальної здатності" ("ВНЗ") проходження резонансу у прямому і зворотному напрямку відбувається стрибком, без розвитку критичних амплітуд (рис. 4). Являє інтерес реалізація запропонованою конструкцією комбінованої пружної характеристики з двома такими ділянками.

Для формування цільової пружної характеристик заздалегідь необхідно знати деякі відправні данні, а саме: кількість ділянок "ВНЗ" *dil* = 2; параметри точок початку цих ділянок у форматі $M_{di}(\varphi_i)$; довжину кожної ділянки у форматі φ_{di}; мінімальне значення моменту при втраті навантажувальної здатності $M_{di\min}$ для кожної ділянки а також відповідне значення кута $\varphi_{di\min}$. Окрім цього, цілком можлива наявність на цільовій пружній характеристиці визначених за деяких умов характерних точок, параметри яких також повинні бути надані у форматі $M_{Qi}(\varphi_{Qi})$,

Для синтезу цільової пружної характеристики, як приклад, застосовані вхідні данні, які заведено у таблицю 1.

Таблиця 1

Вихідні параметри синтезу цільової пружної характеристики

№	Параметр, розмірність	Позначення	Значення
1	Момент, що обумовлює робочій діапазон, [Нм]	M	50
2.	Кут закручування напівмуфт. що обумовлює робочій діапазон, [рад]	$\varphi_{\max}$	0,45
3	Кількість ділянок "ВНЗ", [б/р]	*dil*	2
4.	Момент, що обумовлює початок 1- ї ділянки"ВНЗ", [Нм]	M_{d1}	16
5.	Кут, що обумовлює початок 1-ї "ВНЗ", [рад]	φ_1	0,1
6.	Мінімальний момент 1-ї ділянки "ВНЗ", [Нм]	$M_{d1\min}$	16
7.	Кут, що обумовлює мінімальний момент 1-ї "ВНЗ", [рад]	$\varphi_{1\min}$	0,1
8.	Довжина 1-ї ділянки "ВНЗ", [рад]	φ_{d1}	0,1
9.	Момент, що обумовлює початок 2-ї ділянки "ВНЗ", [Нм]	M_{d2}	26,5
10.	Кут, що обумовлює початок 2-ї ділянки "ВНЗ", [рад]	φ_2	0,3
11.	Момент, що обумовлює характерну точку *Q*, [Нм]	M_Q	10
12.	Кут, що обумовлює характерну точку *Q*, [рад]	φ_Q	0,05
13.	Момент, що обумовлює характерну точку Q_1, [Нм]	M_{Q1}	37
14.	Кут, що обумовлює характерну точку Q_1, [рад]	φ_{Q1}	0,44

При проведенні синтезу цільової пружної характеристики застосовано деякі спрощення, а саме: основні геометричні розміри пасивної пружної муфти відповідають основним геометричним параметрам муфти розглянутої вище.

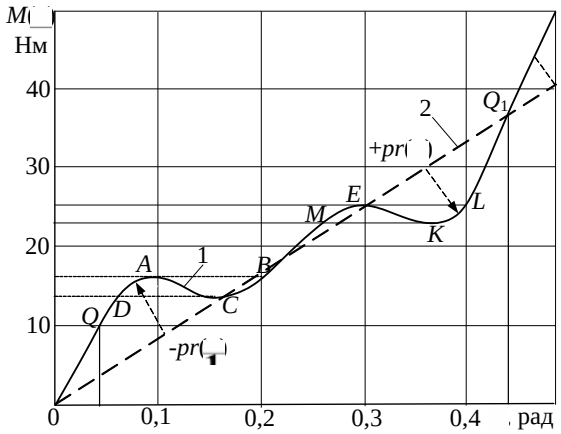


Рис. 5. Формування цільової пружної характеристики

Наявність точок, що обумовлюють початок ділянки ВНЗ і мінімальне значення моменту на них дозволяють отримати додаткові точки цільової пружної характеристики (рис. 5). Наприклад, початок ділянки ВНЗ точка *A* при подальшому навантаженні пристрою визначає додаткову точку *B*. Точка *C*, що визначає мінімальний момент 1-ї ділянки ВНЗ, обумовлює додаткову точку *D*. Таким чином, множина точок 0, Q_1, *D*, *A*, *C*, *B*, *M*, *E*, *K*, *L*, Q_2 цілком достатньо описує потрібну цільову характеристику (графік 1 рис. 5), а множина координат цих точок у форматі $M_i(\varphi_i)$, є вхідними даними для математичної обробки з метою отримання цільової пружної характеристики у вигляді ступеневого полінома.

Виходячи з прийнятих даних поліном, що обумовлює цільову пружну характеристику з величиною достовірності апроксимації $R^2 = 0{,}998$, має вид

$$M_{ц}(\varphi) = 424708\varphi^6 - 397130\,\varphi^5 + 110305\varphi^4 - 2372\,\varphi^3 + 2909\varphi^2 + 378\,\varphi - 2\cdot10^{-5}. \quad (5)$$

Подальші розрахунки зводяться до визначення функції, що обумовлює кривизну управляючого пазу і відповідно параметр $pr(\varphi)$. На початку розрахунку потрібно визначити основні конструктивні параметри. Для цього для полінома за виразом (5) визначається осереднене значення (графік 2, рис. 5).

$$M_{ос}(\varphi) = 110305\varphi. \quad (6)$$

З урахуванням виразів (1), (4) і (6) отримано вираз, що обумовлює взаємозв'язок між основними геометричними параметрами муфти (*r* (по діаметру вала) і *R* (вільний), а також початковою довжиною $l_п$, кількістю *n* і матеріалом (*E*) застосованого пружного елементу і дозволяє визначити необхідні геометричні параметри його перетину

$$J_x = \frac{M_{ос}(\varphi_{max})3nEl_п^{\,3}}{\varphi_{max}(l_п + r)^2}. \quad (7)$$

За результатами розрахунків за виразом (7), а також з урахуванням вихідних параметрів $l_п = 50$ мм, $\varphi_{max} = 0{,}5$ рад і $r = 35$ мм, призначено: $n = 4$ – кількість пружних елементів; форма перетину пружного елементу – прямокутник, $h\times b = 8\times0{,}6$ мм; матеріал пружного елементу сталь 65 (ГОСТ 14959-79) з модулем пружності $E = 2{,}15\times 10^{-5}$ МПа.

Порівняння правої частини виразу (4) з поліномом за виразом (5) дозволяє отримати рівняння, вирішення якого відносно параметру $pr(\varphi)$ і буде обумовлювати потрібну функцію зміни плеча навантаження на пружний елемент

$$\frac{3\cdot4\cdot2{,}15\cdot10^5\cdot0{,}054(80\pm pr(\varphi))^2}{(50\pm pr(\varphi))^3}\,\varphi = \quad (8)$$

$$= 424708\,\varphi^6 - 397130\,\varphi^5 + 110305\,\varphi^4 - 2372\,\varphi^3 + 2909\,\varphi^2 + 378\,\varphi - 2\cdot10^{-5}.$$

Рішення рівняння (8) отримане у вигляді ступеневого полінома

$$pr(\varphi) = 54708\varphi^6 - 37230\,\varphi^5 + 94305\varphi^4 - 1332\varphi^3 + 1609\varphi^2 + 378\,\varphi - 2\cdot10^{-5}, \quad (9)$$

що дозволяє використовувати його з найменшими перетвореннями для програмування станку с ЧПУ при виготовленні диску з криволінійним пазом.

Графічна інтерпретація рішення рівняння (8), дозволяє обумовити вільний параметр *R* (рис. 6). Однак, зважаючи на те, що застосована додаткова механічна структура уявляє собою кулачковий механізм з кінематичним замиканням, необхідно перевірити отриману функцію по кутам тиску між штовхачем і кулачком.

Слід зазначити, що при конструктивній реалізації запропонованого пристрою застосовано Autodesk Inventor. Даний CAD пакет дозволяє безпосередньо в середовищі моделювання досліджувати кінематичні схеми механізмів, що проектуються, на рівні геометричних залежностей між їх складовими елементами. При цьому система здатна відпрацьовувати не тільки залежності складання, але і контакти деталей, моделюючи при цьому різні види реакції між ними. Перевірка кутів тиску, як кутів між вектором швидкості і нормаллю до кривої поверхні у характерних точках за допомогою вбудованого CAD пакет Autodesk Inventor Series модуля дослідження кінематики показав, що на деяких ділянках AB, CD кут тиску перевищує або дорівнює 45°, тобто на цих ділянках можливе заклинювання (рис. 6).

З метою запобігання цього явища проведено оптимізацію геометричних показників криволінійного пазу (збільшення радіусу середньої дуги розташування). При цьому встановлено корегувальний параметр, що з урахуванням вхідних даних дорівнює *Kor* = 20 мм (рис. 7).

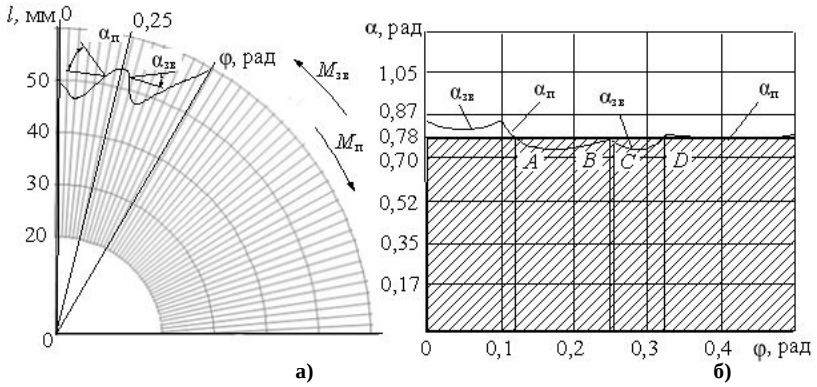
Висновки

На підставі проведених досліджень встановлено, що проведений синтез прийнятої цільової пружної характеристики свідчить про значні можливості запропонованого пристрою по відтворенню необхідних, за визначеними вимогами, пружних характеристик.

При синтезі складних пружних характеристик геометричні параметри додаткової механічної структури необхідно контролювати по контактній взаємодії для запобігання явищ заклинювання.

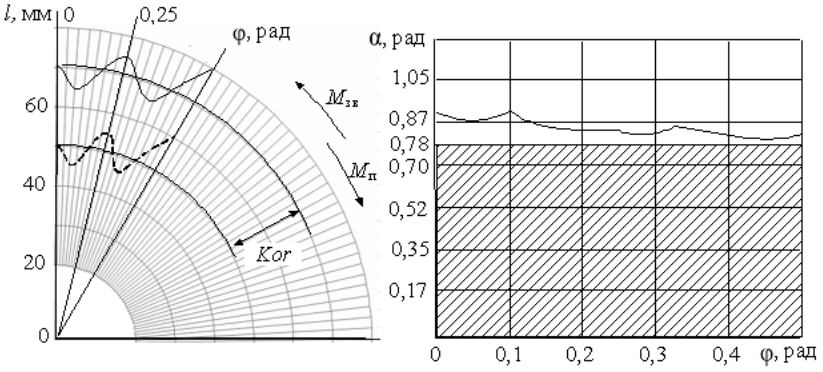
Розрахунок корегувального, за умовою величини кута тиску, параметру *Kor* свідчить про те, що у деяких випадках радіальний розмір пристрою, для повного відтворення його функціональних можливостей може бути збільшено.

Результати синтезу і наведена конструктивна реалізація пружної муфти з нелінійним механічним зворотним зв'язком можуть бути використані під час створення обертальної пружної опори.



а) б)

Рис. 6. Синтез пружної характеристики муфти з нелінійним зворотним зв'язком: радіальний графік зміни плеча навантаження l + pr(φ) пружного елементу (а); кути тиску по кривизні управляючого пазу без корегування (б)



а) б)

Рис. 7. Синтез пружної характеристики муфти з нелінійним зворотним зв'язком: радіальний графік зміни плеча навантаження l + pr(φ) пружного елементу (а); кути тиску по кривизні управляючого пазу з корегуванням (б)

Література

1. Сидоренко И.И. Устройство защиты привода машинных агрегатов от резонансных крутильных колебаний / И.И. Сидоренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1999. – Вып. 3(9). – С. 16–19.
2. Сидоренко І.І. Власна еквівалентна жорсткість крутильного динамічного погашувача з механічним зворотним зв'язком / І.І. Сидоренко, С.В. Атмажов // Вісник СевНТУ. – Севастополь, 2010. – Вып. 110. – С. 153 –156.
3. Курган В.О. Еквівалентна жорсткість пружної муфти з нелінійним механічним зворотним зв'язком / В.О. Курган, І.І. Сидоренко // Праці Одес. політехн. ун-ту. – Одеса : ТЭС. – 2014. – Вып. 1(43). – С. 34–38.
4. Сидоренко І.І. Синтез конструкцій пружних муфт з розширеними функціональними можливостями за допомогою модифікованих кінематичних графів / І.І. Сидоренко, В.О. Курган, К.Г. Мосієнко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : Хмельницький національний університет. –2014. – Вып. 3(213). – С. 173–178.
5. Алабужев П.М. Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью / П.М. Алабужев, А.А. Гритчин, И.И. Ким. – Л. : Машиностроение, 1986. – 96 с.

References

1. Sidorenko I.I. Device for protecting the drive of machine units from resonant torsional oscillations // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 3(9). – 1999 P. 16—19.
2. Sidorenko I.I. Net equivalent torsion stiffness dynamic pohashuvacha with mechanical feedback / I.I. Sidorenko, S.V. Atmazhov // Bulletin SevNTU – Sevastopol, 2010. – Issue 110. – P. 153–156.
3. Kurgan V.O. Equivalent stiffness of elastic coupling with nonlinear mechanical feedback / V.O. Kurgan, I.I. Sidorenko // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi, 1(43). – 2014 P. 34—38.
4. Sidorenko I.I. Synthesis of designs of elastic couplings with expanded functionality with the help of modified kinematic graphs / I.I. Sidorenko, V.O. Kurgan, K.G. Mosienko // Bulletin of the Khmelnytsky National University – Khmelnytskyi, 2014. – 2(213). – P 173 – 178.
5. Alabuzev P.V., Gritchin A.A., Kim I.I. Vibrozachitnie sistemi kvazinulevoy gestkosti. Leningrad, —1986. – 96 c. [in Russian].

Рецензія/Peer review : 13.07.2017 р. Надрукована/Printed :28.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 539.3

А.О. СЯСЬКИЙ, Н.В. ШЕВЦОВА
Рівненський державний гуманітарний університет
О.Ю. ДЕЙНЕКА
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

НАПРУЖЕНА ПОСАДКА ЗАМКНЕНОГО ПРУЖНОГО СТРИЖНЯ В КРИВОЛІНІЙНИЙ ОТВІР НЕСКІНЧЕННОЇ ІЗОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ

Побудована система інтегральних і диференціальних рівнянь, яка описує напружений стан нескінченої ізотропної пластинки з криволінійним отвором та замкненого пружного ребра сталого прямокутного поперечного перерізу, сполучених між собою з допомогою натягу. Методом тригонометричних рядів досліджено залежність компонент напруженого стану в пластинці та ребрі від форми отвору, величини натягу і зовнішнього навантаження. Встановлено мінімальний натяг, за якого відбувається розмикання контакту між пластинкою і ребром.

Ключові слова: напружена посадка, пружне ребро, мінімальний натяг, криволінійний отвір, інтегральні і диференціальні рівняння.

A.O. SIASKYI, N.V. SHEVTSOVA
Rivne State University of Humanities, Ukraine
O.Y. DEJNEKA
National University of Water Management and Natural Resources, Rivne, Ukraine

TENSE LANDING OF THE RESERVED RESILIENT ROD IN CURVILINEAR OPENING OF ENDLESS ISOTROPIC PLATE

A mixed contact problem about the tense landing of a closed curvilinear ring in the curvilinear opening of an infinite isotropic plate, which is in conditions of a homogeneous stressed state at infinity is considered. Using the main integral dependences between the components of the deformation of a curvilinear contour of the opening in the infinite isotropic plate and the equations of the one-dimensional theory of curvilinear rods of a large curvature, a system of integral and differential equations is constructed. This system describes the tension state of the infinite isotropic plate with a curvilinear opening and a closed resilient rib of a changeless rectangular cross-section, which are interconnected by tension. The method of trigonometric series investigates the dependence of the components of the stress state on the plate and the rib from the shape of the opening, value of the tension and external load. A minimum tension is established, in which the contact between the plate and the rib is unlocked.

Keywords: tense landing, resilient rib, minimum pull, curvilinear opening, integral and differential equations.

Вступ

В сучасному машинобудуванні широко використовуються пресові з’єднання, в яких відносна нерухомість циліндричних тіл досягається за рахунок натягу. Висока концентрація напружень у з’єднаннях з натягом є визначальним фактором їх міцності і довговічності. Величина натягу визначається зовнішнім навантаженням, яке передається від одного тіла до іншого, та наявністю в зоні контакту сил тертя.

Розрахунку напружених посадок з використанням функцій комплексної змінної присвячена монографія [1]. Окремі задачі про запресовку круглих пружних дисків у пластини наведені в роботах [1, 2]. Огляд досліджень напруженого стану в циліндричних тілах кругової форми, з’єднаних між собою з допомогою натягу, здійснено в монографії [2] та оглядовій статті [3].

У роботах [4, 5] сформульовано уточнений варіант граничних умов задачі про напружену посадку з натягом абсолютно жорсткого диска в криволінійний отвір нескінченної ізотропної (ортотропної) пластинки. Методом тригонометричних рядів досліджено залежність напруженого стану з’єднання від форми отвору, ортотропії матеріалу пластинки, зовнішнього навантаження та величини натягу.

Задачі про запресовку замкнених пружних стрижнів у криволінійний отвір нескінченної ізотропної (ортотропної) пластинки розглянуто в [6–9]. Тут використано балкову модель стрижня і особливі крайові умови задачі в інтегральній формі без урахування деформацій поперечного зсуву.

Формулюючи граничні умови у вигляді рівності кривин контактуючих тіл у роботі [10] розглянута задача про напружену посадку пружного кільця в круглий отвір нескінченної ізотропної пластинки. Для отворів, відмінних від кругового, такі задачі не розглядалися.

В уточненій постановці пропонується розв’язок мішаної контактної задачі про напружену посадку замкненого пружного кільця сталого поперечного перерізу в криволінійний отвір нескінченної ізотропної пластинки.

Постановка задачі

Розглянемо нескінченну ізотропну пластинку товщиною $2h$ з криволінійним отвором, обмеженим гладкою циліндричною поверхнею. Серединна площина пластинки віднесена до декартової (x, y) та полярної (r, δ) систем відліку з полюсом у центрі отвору. Лінію її перетину з поверхнею отвору позначимо через Γ і будемо називати контуром отвору.

Припустимо, що в отвір пластинки з натягом $\Delta = \text{const}$ запресоване пружне кільце сталого прямокутного поперечного перерізу $2h_0 \times 2\eta$ ($2h_0$ – висота кільця, 2η – його ширина), яке симетричне

відносно серединної площини пластинки (рис. 1).

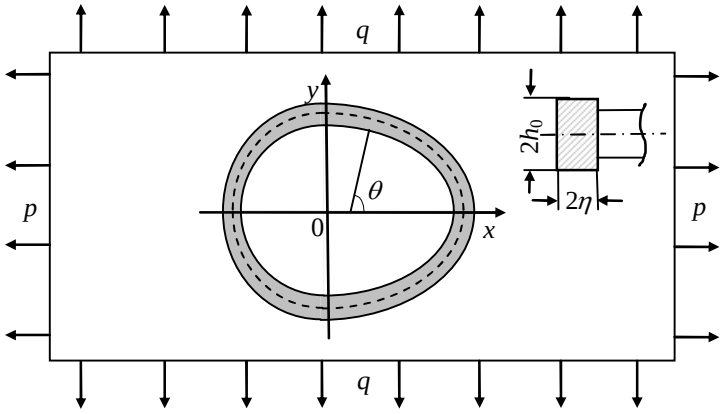


Рис. 1. Розрахункова схема задачі

Пружна система пластинка-кільце перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану, створеного рівномірно розподіленими зусиллями p і q, які діють на нескінченності вздовж координатних осей.

Мета роботи

Визначення напруженого стану на контурі Γ пластинки та в пружному кільці; встановлення мінімального натягу $\Delta_{\min}$, за якого розпочинається розмикання контакту між пластинкою і кільцем.

Основні рівняння задачі

Умовно відділивши кільце від пластинки, замінивши дію одного тіла на інше нормальними T_ρ і дотичними $S_{\rho\lambda}$ контактними зусиллями, приходимо до першої основної задачі для пластинки з криволінійним отвором та пружного кільця.

Пластинка перебуває в пружній рівновазі під дією контактних зусиль на контурі Γ і навантаження на нескінченності.

Нехай форма отвору в пластинці визначається функцією [11]

$$z = x + iy = \omega(\xi) = R_0\left(\xi + \frac{\varepsilon_1}{\xi} + \frac{\varepsilon_2}{\xi^2} + \frac{\varepsilon_3}{\xi^3}\right), \tag{1}$$

яка здійснює конформне відображення зовнішності S^- одиничного кола γ в площині $\xi = \tilde{\rho}e^{i\lambda}$ на область, яку займає серединна площина пластинки. Тут R_0 – характерний розмір отвору (не порушуючи загальності, приймаємо $R_0 = 1$); $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – параметри, які характеризують відхилення контуру Γ від кола. За умови $|\varepsilon_1| + 2|\varepsilon_2| + 3|\varepsilon_3| < 1$ функція (1) визначає контур Γ як комбінацію кола, еліпса, правильних трикутника і квадрата із закругленими кутами.

Компоненти напружено-деформованого стану пластинки в точках контуру Γ визначаються зі співвідношень [11]

$$T_\rho = \frac{\alpha T_\rho^* + \beta S_{\rho\lambda}^*}{\alpha^2 + \beta^2}; \qquad S_{\rho\lambda} = \frac{\alpha S_{\rho\lambda}^* - \beta T_\rho^*}{\alpha^2 + \beta^2}; \qquad \varepsilon_\lambda = \frac{\alpha\varepsilon_\lambda^* + \beta V^*}{\alpha^2 + \beta^2}; \qquad V = \frac{\alpha V^* - \beta\varepsilon_\lambda^*}{\alpha^2 + \beta^2};$$
$$T_\lambda = \nu T_\rho + 2Eh\varepsilon_\lambda; \qquad k(\lambda) = \frac{1}{\rho}\left[1 - \varepsilon_\lambda + \frac{dV}{d\theta}\right], \tag{2}$$

в яких введено такі позначення

$$\varepsilon_\lambda^* = \frac{1}{2Eh}\left[(1-\nu)T_\rho^*(\lambda) - \frac{1}{\pi}\oint_\gamma T_\rho^*(t)dt + \frac{1}{\pi}\oint_\gamma S_{\rho\lambda}^*(t)ctg\frac{\lambda - t}{2}dt + \varepsilon_\lambda^0\right]; \qquad \alpha(\lambda) + i\beta(\lambda) = \frac{d}{d\sigma}\omega(\sigma); \qquad \sigma = e^{i\lambda};$$
$$V^* = \frac{1}{2Eh}\left[(1-\nu)S_{\rho\lambda}^*(\lambda) - \frac{1}{\pi}\oint_\gamma S_{\rho\lambda}^*(t)dt - \frac{1}{\pi}\oint_\gamma T_\rho^*(t)ctg\frac{\lambda - t}{2}dt + V^0\right]; \quad e^{i\theta} = e^{i\lambda}\frac{\alpha + i\beta}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}};$$
$$\varepsilon_\lambda^0 = (p+q)(2 - \alpha(\lambda)) + [2(q-p) + \varepsilon_1\varepsilon_3(p+q) - 4\alpha_1\varepsilon_3]\cos 2\lambda;$$
$$V^0 = -(p+q)\beta(\lambda) + [2(p-q) - \varepsilon_1\varepsilon_3(p+q) + 4\alpha_1\varepsilon_3]\sin 2\lambda;$$
$$(1-\varepsilon_3)\alpha_1 = -\frac{1}{2\pi}\oint_\gamma [T_\rho^*(t)\cos 2t - S_{\rho\lambda}^*\sin 2t]dt - \frac{1}{2}(q-p) - \frac{p+q}{4}(\varepsilon_1 + \varepsilon_1\varepsilon_3), \tag{3}$$

ε_λ, V – відносне видовження в точках контуру Γ і кут повороту нормалі до нього; T_λ – кільцеві зусилля на

Γ; $k(\lambda)$ – кривина деформованого контуру Γ; ρ – радіус кривини недеформованого контуру; θ – кут між нормаллю до Γ і віссю Ox; E, ν – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластинки; $i=\sqrt{-1}$.

Пружне кільце моделюємо замкненим криволінійним стрижнем серединна поверхня якого не співпадає з поверхнею його сполучення з пластинкою. Деформація кільця контактними зусиллями описується основними рівняннями одновимірної теорії криволінійних стрижнів великої кривини [12] з урахуванням деформацій поперечного зсуву.

Диференціальні рівняння рівноваги елемента стрижня можна записати у вигляді

$$T_\rho=\frac{N}{\rho}-\frac{dQ}{ds},\qquad S_{\rho\lambda}=-\frac{dN}{ds}-\frac{Q}{\rho},\qquad \frac{dL_b}{ds}-\left(1-\frac{\eta}{\rho}\right)Q=0\,. \tag{4}$$

Тут N, Q, L_b – внутрішні поздовжня та поперечна сили і згинальний момент, які виникають у поперечних перерізах стрижня і віднесені до його осі; ds – елемент дуги зовнішнього поздовжнього волокна стрижня, яке контактує з пластинкою.

Компоненти деформації цього волокна визначаються за формулами [11]

$$\varepsilon_\lambda^{(c)}=\frac{N}{g_4}+\left(1-\frac{r_0}{\rho}\right)\frac{RL_b}{g_2};\qquad \frac{d\theta_b}{d\theta}=\frac{N}{g_4}+\frac{RL_b}{g_2}-\frac{2(1+\nu_0)\mu}{g_4}\frac{dQ}{d\theta};\qquad k^{(c)}(\lambda)=\frac{1}{\rho+\Delta}\left(1-\varepsilon_\lambda^{(c)}+\frac{d\theta_b}{d\theta}\right), \tag{5}$$

де $\varepsilon_\lambda^{(c)}$, θ_b – відносне видовження волокна і кут повороту нормалі до нього; $k^{(c)}$ – кривина деформованого волокна; $F_0=2h_0 2\eta$ –площа перерізу стрижня; $g_4=E_0F_0$ – жорсткість стрижня на розтяг (стиск); $g_2=\omega_0 g_4$ – жорсткість на згин в площині його осі; r_0, R – радіуси кривини нейтрального для чистого згину і осьового волокон стрижня; E_0, ν_0 – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу стрижня; μ – стала (для прямокутного перерізу $\mu=1,2$).

У співвідношеннях (4), (5) враховано, що $\rho\approx\rho+\Delta$, але $\Delta>0$.

Граничні умови контактування пластинки і кільця формулюємо у вигляді рівності їх кривин на ділянці контакту При відсутності тертя між пластинкою і кільцем на підставі на підставі (2), (3), (5) ці умови можна подати так:

$$\varepsilon_\lambda-\frac{dV}{d\theta}-\varepsilon_\lambda^{(c)}+\frac{d\theta_b}{d\theta}=\frac{\Delta}{\rho};\qquad \alpha S_{\rho\lambda}^*-\beta T_\rho^*=0\,. \tag{6}$$

Підставляючи (2), (5) в умови (6) з урахуванням (3), одержимо після певних перетворень

$$\begin{aligned}&\left[\alpha+\frac{d\lambda}{d\theta}\left(\beta\frac{d}{d\lambda}+\beta'-\frac{2\beta(\alpha\alpha'+\beta\beta')}{\alpha^2+\beta^2}\right)\right]\left[(1-\nu)T_\rho^*(\lambda)-\frac{1}{\pi}\oint_\gamma T_\rho^*(t)dt+\frac{1}{\pi}\oint_\gamma S_{\rho\lambda}^*(t)ctg\frac{\lambda-t}{2}dt+\varepsilon_\lambda^0\right]+\\&+\left[\beta-\frac{d\lambda}{d\theta}\left(\alpha\frac{d}{d\lambda}+\alpha'-\frac{2\alpha(\alpha\alpha'+\beta\beta')}{\alpha^2+\beta^2}\right)\right]\left[(1-\nu)S_{\rho\lambda}^*(\lambda)-\frac{1}{\pi}\oint_\gamma S_{\rho\lambda}^*(t)dt-\frac{1}{\pi}\oint_\gamma T_\rho^*(t)ctg\frac{\lambda-t}{2}dt+V^0\right]+\\&+\frac{2Eh}{g_4}\left(\alpha^2+\beta^2\right)\left(\frac{r_0R}{\rho\omega_0}L_b-2(1+\nu_0)\mu\frac{dQ}{d\theta}\right)=\frac{2Eh\Delta}{\rho}\left(\alpha^2+\beta^2\right);\quad \alpha S_{\rho\lambda}^*-\beta T_\rho^*=0\,.\end{aligned} \tag{7}$$

Тут і надалі штрих – символ диференціювання відповідної функції по λ.

Граничні умови (7) доповнюємо рівняннями (4), перетвореними до вигляду

$$\frac{\rho}{\alpha^2+\beta^2}\left(\alpha T_\rho^*(\lambda)+\beta S_{\rho\lambda}^*(\lambda)\right)=N(\theta)+\frac{d^2N(\theta)}{d\theta^2};\qquad \frac{dN(\theta)}{d\theta}+Q(\theta)=0;\qquad \frac{dL_b(\theta)}{d\theta}-RQ(\theta)=0\,. \tag{8}$$

Співвідношення (7), (8) визначають математичну модель поставленої задачі і слугують для визначення функцій T_ρ^*, $S_{\rho\lambda}^*$ на контурі Γ в пластинці та величин N, Q, L_b в кільці.

Наближений розв'язок задачі

Точний розв'язок системи (7), (8) знайти не вдається. Для її наближеного розв'язання використовуємо метод скінченних тригонометричних рядів.

Оскільки контакт між пластинкою і кільцем неперервний, тому, враховуючи симетрію задачі відносно осі Ox, функції T_ρ^*, $S_{\rho\lambda}^*$ обираємо у вигляді

$$T_\rho^*(\lambda)=\frac{A_0}{2}+\sum_{n=1}^{N_0}A_n\cos n\lambda;\qquad S_{\rho\lambda}^*(\lambda)=\sum_{n=1}^{N_0}B_n\sin n\lambda\,. \tag{9}$$

Для забезпечення однозначності зміщень в пластинці повинна виконуватися умова

$$A_1=B_1\,. \tag{10}$$

Використовуючи формулу [13]

$$\frac{1}{\pi}\oint_\gamma\begin{Bmatrix}\cos mx\\ \sin mx\end{Bmatrix}ctg\frac{\lambda-t}{2}dt=2\begin{Bmatrix}\sin mx\\ -\cos mx\end{Bmatrix},$$

вирази для $\varepsilon_\lambda^*, V^*$ запишемо так:

$$\varepsilon_\lambda^* = \frac{1}{2Eh}\left[-(1+\nu)\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0}[(1-\nu)A_n - 2B_n]\cos n\lambda + \varepsilon_\lambda^0\right]; \quad V^* = \frac{1}{2Eh}\left[\sum_{n=1}^{N_0}[-2A_n + (1-\nu)B_n]\sin n\lambda + V^0\right]. \tag{11}$$

Внутрішні сили і згинальний момент у поперечних перерізах кільця змінюються неперервно, тому їх також подаємо скінченними тригонометричними сумами

$$N(\theta) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0} C_n \cos n\theta; \qquad Q(\theta) = \sum_{n=1}^{N_0} E_n \sin n\theta; \qquad \overline{L}_b(\theta) = R\,L_b(\theta) = \frac{D_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0} D_n \cos n\theta\,. \tag{12}$$

При такому виборі функцій N, Q, L_b умова однозначності зміщень (10) в пластинці виконується тотожно, а умова однозначності кута повороту θ_b стрижня забезпечується співвідношенням

$$\oint_\gamma d\theta_b = \oint_\gamma \left[\frac{N(\theta)}{g_4} + \frac{\overline{L}_b(\theta)}{g_2}\right] d\theta = 0\,,$$

з якого, на підставі (12), знаходимо

$$\frac{C_0}{2} + \frac{D_0}{2\omega_0} = 0\,. \tag{13}$$

Підстановка (9), (11), (12) з урахуванням (3), (13) у співвідношення (7), (8) призводить до системи функціональних рівнянь для визначення сталих $A_0, C_0, D_0, A_n, B_n, C_n, D_n, E_n$

$$\frac{A_0}{2}a_0(\lambda) + \sum_{n=1}^{N_0}[A_n a_n(\lambda) + B_n b_n(\lambda)] + \frac{2Eh(\alpha^2+\beta^2)}{g_4}\left[\frac{r_0}{\rho\omega_0}\left(\frac{D_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0} D_n \cos n\theta\right) - 2(1+\nu_0)\mu\sum_{n=1}^{N_0} n E_n \cos n\theta\right] =$$

$$= \frac{2Eh\Delta(\alpha^2+\beta^2)}{\rho} - \alpha\varepsilon_\lambda^0 - \beta V^0 + \frac{d\lambda}{d\theta}\left[\alpha V^{0\prime} - \beta\varepsilon_\lambda^{0\prime} + \alpha' V^0 - \beta'\varepsilon_\lambda^0 - \frac{2(\alpha\alpha'+\beta\beta')}{\alpha^2+\beta^2}\left(\alpha V^0 - \beta\varepsilon_\lambda^0\right)\right];$$

$$\beta\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0}[\beta A_n \cos n\lambda - \alpha B_n \sin n\lambda] = 0; \qquad \alpha\frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0}[\alpha A_n \cos n\lambda + \beta B_n \sin n\lambda] = \frac{\alpha^2+\beta^2}{\rho}\left[\frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0} C_n(1-n^2)\cos n\theta\right];$$

$$E_n = nC_n; \qquad \frac{d\rho}{d\theta}\frac{D_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_0}\left[\left(nR\sin n\theta + \frac{d\rho}{d\theta}\cos n\theta\right)D_n + nR^3 C_n \sin n\theta\right] = 0; \qquad \frac{C_0}{2} + \frac{D_0}{2\omega_0} = 0. \tag{14}$$

Тут введено позначення

$$a_0(\lambda) = -(1+\nu)\left[\alpha + \frac{d\lambda}{d\theta}\left(\beta' - \frac{2\beta(\alpha\alpha'+\beta\beta')}{\alpha^2+\beta^2}\right)\right]; \qquad a_n(\lambda) = (1-\nu)\alpha\cos n\lambda - 2\beta\sin n\lambda -$$

$$-\frac{d\lambda}{d\theta}\left[(1-\nu)\beta n\sin n\lambda - 2\alpha n\cos n\lambda - 2\alpha'\sin n\lambda - (1-\nu)\beta'\cos n\lambda + \frac{2(\alpha\alpha'+\beta\beta')}{\alpha^2+\beta^2}(2\alpha\sin n\lambda + (1-\nu)\beta\cos n\lambda)\right];$$

$$b_n(\lambda) = (1-\nu)\beta\sin n\lambda - 2\alpha\cos n\lambda - \frac{d\lambda}{d\theta}\left[(1-\nu)\alpha n\cos n\lambda - 2\beta n\sin n\lambda + (1-\nu)\alpha'\sin n\lambda + 2\beta'\cos n\lambda -\right.$$

$$\left.-\frac{2(\alpha\alpha'+\beta\beta')}{\alpha^2+\beta^2}((1-\nu)\alpha\sin n\lambda + 2\beta\cos n\lambda)\right], \quad \lambda \in [0;\, 2\pi].$$

Наближений розв’язок системи (14) можна визначити методом колокації.

Якщо шукані сталі стануть відомі, то компоненти напруженого стану на контурі Γ в пластинці знаходяться за формулами (2), (3), (11).

Нормальні напруження у зовнішніх і внутрішніх поздовжніх волокнах ребра, на підставі (5), визначаються зі співвідношень

$$\sigma^{(c)}(\rho) = \frac{1}{F_0}\left(N + \left(1 - \frac{r_0}{\rho}\right)\frac{R\,L_b}{\omega_0}\right); \quad \sigma^{(c)}(\rho - 2\eta) = \frac{1}{F_0}\left(N + \left(1 - \frac{r_0}{\rho - 2\eta}\right)\frac{R\,L_b}{\omega_0}\right). \tag{15}$$

Найбільші дотичні напруження, які виникають в осьовому волокні ребра, можна знайти за формулою Журавського [14]

$$\tau_{\max}^{(c)} = \frac{3}{2}\frac{Q}{F_0}\,. \tag{16}$$

Для пластинки з криволінійним $(\varepsilon_1 = -0.08;\ \varepsilon_2 = 0.05;\ \varepsilon_3 = 0)$ отвором і пружного кільця з параметрами $h_0/h = 4/3$; $\eta = 0.05R_0$; $E_0/E = 2$ запропонованим методом досліджено вплив зовнішнього навантаження та натягу на розподіл зусиль T_ρ і T_λ по контуру Γ в пластинці та нормальних напружень $\sigma^{(c)}$ в крайніх поздовжніх волокнах кільця.

Результати числового розрахунку при $N_0 = 125$ наведені на рис. 2–3 $(p \neq 0;\ q = 0)$ і рис. 4–5 $(p = 0;\ q \neq 0)$. Суцільні лінії відповідають випадку $\Delta = \Delta_{\min}$, штрихові – $\Delta = 1.5\Delta_{\min}$, штрих-пунктирні – $\Delta = 2\Delta_{\min}$.

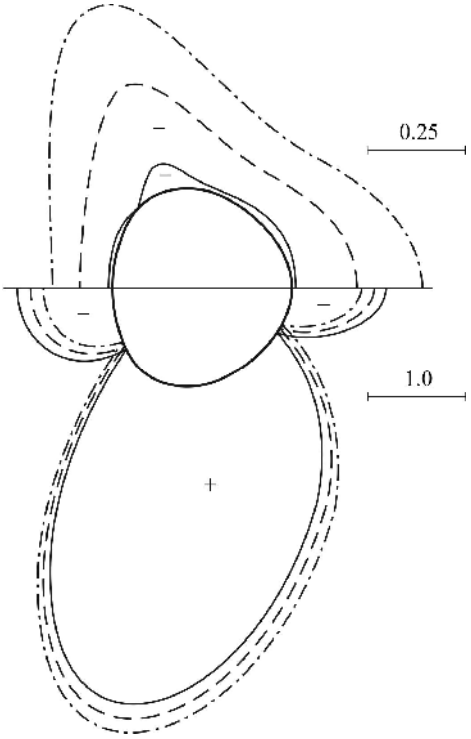


Рис. 2. Розподіл контактних T_ρ / p (верхня частина) і кільцевих T_λ / p (нижня частина) зусиль по контуру Γ пластинки

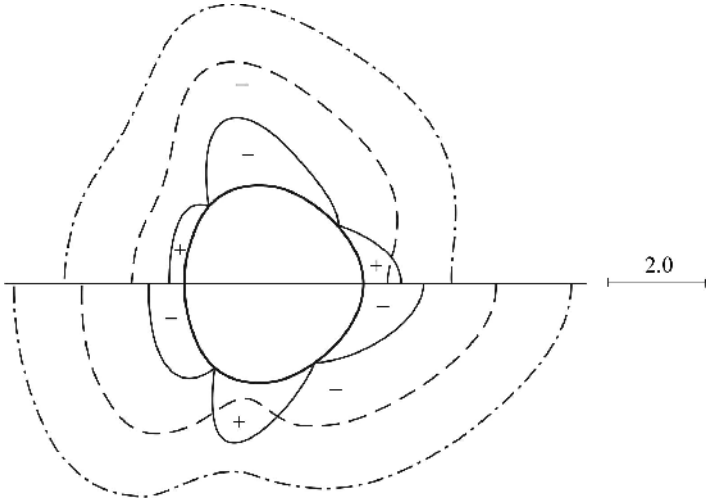


Рис. 3. Розподіл нормальних напружень $\sigma^{(c)} 2h_0 / p$ у зовнішньому (верхня частина) і внутрішньому (нижня частина) поздовжніх волокнах кільця

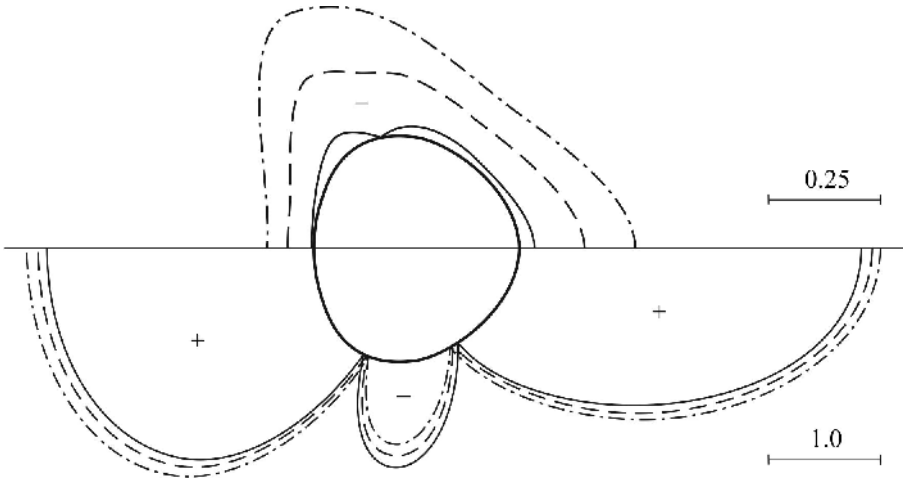


Рис. 4. Розподіл контактних T_ρ / q (верхня частина) і кільцевих T_λ / q (нижня частина) зусиль по контуру Γ пластинки

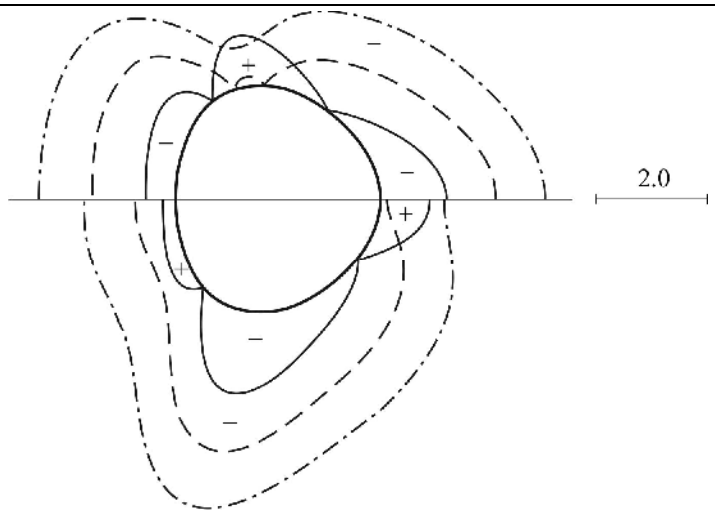


Рис. 5. Розподіл нормальних напружень $\sigma^{(c)} 2h_0 / q$ у зовнішньому (верхня частина) і внутрішньому (нижня частина) поздовжніх волокнах кільця

У процесі розв'язання задачі методом дихотомії встановлено мінімальний натяг $\Delta_{\min}$ і відповідний йому полярний кут δ^* точки розмикання контакту між пластинкою і кільцем:

$$2Eh\Delta_{\min} / p = 1.2189; \qquad \delta^* = 128.42\,(\textit{град}) \quad \text{при} \quad p \neq 0,\ q = 0;$$

$$2Eh\Delta_{\min} / q = 0.8407; \qquad \delta^* = 104.43\,(\textit{град}) \quad \text{при} \quad p = 0,\ q \neq 0.$$

Точність методу оцінювалася співставленням результатів розрахунку для різних значень N_0. Зауважимо, що починаючи з $N_0 = 25$ всі результати повністю співпадають, що свідчить про добру збіжність запропонованого методу.

Висновки

У результаті аналізу одержаних результатів встановлено:

– зі збільшенням величини натягу, незалежно від виду зовнішнього навантаження, суттєво збільшуються компоненти напруженого стану в кільці; в меншій мірі вплив натягу стосується напружень на контурі отвору в пластинці;

– найбільші дотичні напруження в осьовому волокні на порядок менші від нормальних напружень в крайніх волокнах; це дає змогу в інженерних розрахунках нехтувати впливом поперечних сил;

– запропонований метод розв'язання задачі має добру збіжність для контурів Γ з плавною зміною їх кривини. У випадку різкої зміни кривини порушується гіпотеза плоских перерізів, внаслідок чого основні рівняння одновимірної теорії криволінійних стрижнів втрачають зміст.

Література

1. Тарабасов Н.Д. Расчет напряженных посадок в машиностроении / Н.Д. Тарабасов. – М. : Машгиз, 1961. – 364 с.

2. Теплый М.И. Контактные задачи для областей с круговыми границами / М.И. Теплый. – Львов : Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1983. – 176 с.

3. Семенов-Ежов И.Е. Проблема концентрации напряжений в соединениях с натягом (обзор) / И.Е. Семенов-Ежов // Вестник машиностр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 2001. – № 4. – С. 37–40.

4. Комбель С.М. Посадка жорсткого диска в еліптичний отвір нескінченної ортотропної пластинки / С.М. Комбель // Машинознавство. – 2003. – № 8. – С. 25–31.

5. Сяський А.О. Граничні умови контактних задач для нескінченної пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска / А.О. Сяський, С.М. Комбель // Волинський математичний вісник. – Рівне, 2001. – Вип. 8. – С. 93–97.

6. Мартынович Т.Л. Впрессовка замкнутого стержня в криволинейное отверстие изотропной пластинки / Т.Л. Мартынович, М.К. Зварич // Прикл. механика. – 1974. – Т. 10. – № 9. – С. 46–52.

7. Мартынович Т.Л. О напряженном состоянии анизотропной пластинки, в криволинейное отверстие которой впрессован замкнутый стержень / Т.Л. Мартынович, М.К. Зварич, В.С. Щукин // Механика полимеров. – 1976. – № 9. – С. 304–309.

8. Батишкіна Ю.В Часткове підкріплення криволінійних отворів в пластинках тонкими пружними стержнями змінної жорсткості / Ю.В. Батишкіна // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів, 2003. – С. 316–318.

9. Мартынович Т.Л. Определение напряженного состояния пластинки с разомкнутым ребром жесткости / Т.Л. Мартынович, В.А. Сяський // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 8. – С. 32–34.

10. Дейнека О.Ю. Напружена посадка замкненого кругового стрижня в круговий отвір нескінченної ізотропної пластинки / О.Ю. Дейнека, В.А. Сяський // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Технічні науки. – Рівне : НУВГП, 2017. – Вип. 2 (74). – С. 349–356.

11. Сяський А. Застосування методу сил для статичного розрахунку замкнених криволінійних стрижнів / А. Сяський, Н. Шевцова // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2015. – № 3 (79). – С. 24–30.

12. Алгоритмы построения разрешающих уравнений механики стержневых систем / А.П. Филин, О.Д. Тананайко, И.М. Чернева, М.А. Шварц. – Л. : Стройиздат, 1983. – 232 с.

13. Гахов Ф.Д. Краевые задачи / Ф.Д. Гахов. – М. : Наука, 1977. – 455 с.

14. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. – К. : Вища школа, 2004. – 655 с.

References

1. Tarabasov N.D. Raschet napriazhennыkh posadok v mashynostroenyy / N.D. Tarabasov. – M. : Mashhyz, 1961. – 364 s.

2. Teplyi M.Y. Kontaktnye zadachy dlia oblastei s kruhovыmy hranytsamy / M.Y. Teplyi. – Lvov : Vyshcha shkola, Yzd-vo pry Lvov. un-te, 1983. – 176 s.

3. Semenov-Ezhov Y.E. Problema kontsentratsyy napriazhenyi v soedynenyiakh s natiahom (obzor) / Y.E. Semenov-Ezhov // Vestnyk mashynostr. MVTU ym. N.E. Baumana. – 2001. – # 4. – S. 37–40.

4. Kombel S.M. Posadka zhorstkoho dyska v eliptychnyi otvir neskinchennoi ortotropnoi plastynky / S.M. Kombel // Mashynoznavstvo. – 2003. – # 8. – S. 25–31.

5. Siaskyi A.O. Hranychni umovy kontaktnykh zadach dlia neskinchennoi plastynky z kryvoliniinym otvorom i zhorstkoho dyska / A.O. Siaskyi, S.M. Kombel // Volynskyi matematychnyi visnyk. – Rivne, 2001. – Vyp. 8. – S. 93–97.

6. Martynovych T.L. Vpressovka zamknutoho sterzhnia v kryvolyneinoe otverstye yzotropnoi plastynky / T.L. Martynovych, M.K. Zvarych // Prykl. mekhanyka. – 1974. – T. 10. – # 9. – S. 46–52.

7. Martynovych T.L. O napriazhennom sostoianyy anyzotropnoi plastynky, v kryvolyneinoe otverstye kotoroi vpressovan zamknutyi sterzhen / T.L. Martynovych, M.K. Zvarych, V.S. Shchukyn // Mekhanyka polymerov. – 1976. – # 9. – S. 304–309.

8. Batyshkina Yu.V Chastkove pidkriplennia kryvoliniinykh otvoriv v plastynkakh tonkymy pruzhnymy sterzhniamy zminnoi zhorstkosti / Yu.V. Batyshkina // Matematychni problemy mekhaniky neodnoridnykh struktur. – Lviv, 2003. – S. 316–318.

9. Martynovych T.L. Opredelenye napriazhennoho sostoianyia plastynky s razomknutыm rebrom zhestkosty / T.L. Martynovych, V.A. Siaskyi // Yzv. vuzov. Stroytelstvo y arkhytektura. – 1985. – # 8. – S. 32–34.

10. Deineka O.Yu. Napruzhena posadka zamknenoho kruhovoho stryzhnia v kruhovyi otvir neskinchennoi izotropnoi plastynky / O.Yu. Deineka, V.A. Siaskyi // Visnyk NUVHP. Zbirnyk naukovykh prats. Tekhnichni nauky. – Rivne : NUVHP, 2017. – Vyp. 2 (74). – S. 349–356.

11. Siaskyi A. Zastosuvannia metodu syl dlia statychnoho rozrakhunku zamknenykh kryvoliniinykh stryzhniv / A. Siaskyi, N. Shevtsova // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – 2015. – # 3 (79). – C. 24–30.

12. Alhorytmy postroenyia razreshaiushchykh uravnenyi mekhanyky sterzhnevykh system / A.P. Fylyn, O.D. Tananaiko, Y.M. Cherneva, M.A. Shvarts. – L. : Stroiyzdat, 1983. – 232 s.

13. Hakhov F.D. Kraevye zadachy / F.D. Hakhov. – M. : Nauka, 1977. – 455 s.

14. Pysarenko H.S. Opir materialiv / H.S. Pysarenko, O.L. Kvitka, E.S. Umanskyi. – K. : Vyshcha shkola, 2004. – 655 s.

Рецензія/Peer review : 07.06.2017 р. Надрукована/Printed :31.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 539.3

А.О. РАМСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

ПОВЕДІНКА В НУЛІ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ДЛЯ ПЛИТИ, ПОКРИТОЇ ШАРОМ ІЗ ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Розглянута двошарова плита з початковими напруженнями. Конструкція лежить на жорсткому абсолютно гладкому півпросторі. Міжшаровий контакт – ідеальний. Представлено розв'язок задачі. Метою роботи є дослідження поведінки розв'язку в околі нуля.

Ключові слова: двошарова плита, початкові напруження.

A.O. RAMSKY
Khmelnytskyi National University

THE BEHAVIOR OF SOLUTION IN ZERO FOR PLATE UNDER EXTERNAL LOAD BY ITS COVER LAYER WITH INITIAL STRESSES

The double layer plate with initial tension is considered. The structure lays on absolutely rigid smooth half-space. Interlayer contact is perfect. The plate is under combined normal and tangential load. The plate and the load are axisymmetric. The solution of the problem is presented. The aim of the article is the research of behaviour of solutions in a neighborhood of zero. The functional system of equations was implemented by Gauss method. Solutions near origin are obtained. The analysis of the results was carrying out. Obtained results are using at further numerical realization of problem.

Keywords: double layer plate, initial stresses.

У роботі [1]отримано розв'язок осесиметричної задачі для нескінченної плити, що лежить на жорсткій основі, покритої шаром-протектором із початковими напруженнями.

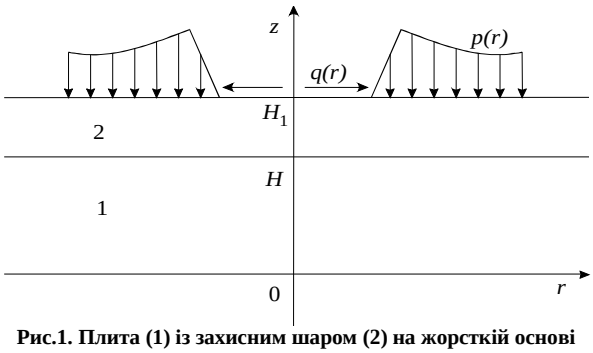


Рис.1. Плита (1) із захисним шаром (2) на жорсткій основі

Граничні умови:

$$\tilde{Q}^{(2)}_{33|z=H_1} = p(r),\ \tilde{Q}^{(1)}_{3r|z=0} = 0,$$

$$\tilde{Q}^{(2)}_{3r|z=H_1} = q(r),\ u^{(1)}_{3|z=0} = 0, \qquad (1)$$

$0 \le r \le a$, a – радіус завантаженого кругу.

Умови спряження шарів

$$\tilde{Q}^{(1)}_{33|z=H} = \tilde{Q}^{(2)}_{33|z=H},\ u^{(1)}_{3|z=H} = u^{(2)}_{3|z=H},$$

$$\tilde{Q}^{(1)}_{3r|z=H} = \tilde{Q}^{(2)}_{3r|z=H},\ u^{(1)}_{r|z=H} = u^{(2)}_{r|z=H} \qquad (2)$$

Конструкція знаходиться під дією осесиметричного нормального розподіленого навантаження інтенсивністю $p(r)$, та дотичного $q(r)$. Міжшаровий контакт – ідеальний. Розв'язки задачі будуються в циліндричній системі координат r, θ, z.

Задача розглядається в рамках лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями. Згідно до [3], [4], загальні розв'язки для нормальних та дотичних напружень $\tilde{Q}^{(i)}_{33}$ та $\tilde{Q}^{(i)}_{3r}$ i-го шару, а також осьові та радіальні переміщення $u^{(i)}_3$ та $u^{(i)}_r$ мають наступний вигляд:

для шару 1, що лежить на жорсткій основі

$$u^{(1)}_r = -\int_0^\infty \xi \left[\xi A_1(\xi)\left(2ch\xi z + \xi z sh\xi z\right) + B_1(\xi) ch\xi z \right] J_1(\xi r)\, d\xi$$

$$u^{(1)}_3 = \frac{m^{(1)}_1}{\sqrt{n^{(1)}_1}} \int_0^\infty \xi \left[\left(\xi\left(1 + s^{(1)}_1\right) sh\xi z + \xi^2 z ch\xi z \right) A_1(\xi) + B_1(\xi) sh\xi z \right] J_0(\xi r)\, d\xi$$

$$\tilde{Q}^{(1)}_{33} = c^{(1)}_{44}\left(1 + m^{(1)}_1\right) l^{(1)}_1 \int_0^\infty \xi^2 \left[\left(\left(1 + s^{(1)}_1\right) ch\xi z + \xi z sh\xi z \right) A_1(\xi) + B_1(\xi) ch\xi z \right] J_0(\xi r)\, d\xi$$

$$\tilde{Q}^{(1)}_{3r} = -\frac{c^{(1)}_{44}\left(1 + m^{(1)}_1\right)}{\sqrt{n^{(1)}_1}} \int_0^\infty \xi^2 \left[\left(\xi + \xi^2 z\right) ch\xi z A_1(\xi) + B_1(\xi) sh\xi z \right] J_1(\xi r)\, d\xi;$$

а для захисного шару, що лежить на пружній основі (на плиті)

$$u^{(2)}_r = -\int_0^\infty \xi^2 \left[\left(A_2(\xi) + zB_2(\xi)\right) e^{\xi z} + \left((1 - \xi z) C_2(\xi) + z(2 - \xi z) D_2(\xi)\right) e^{-\xi z} \right] J_1(\xi r)\, d\xi$$

$$u^{(2)}_3 = \frac{m^{(2)}_1}{\sqrt{n^{(2)}_1}} \int_0^\infty \xi \left[\left(\xi A_2(\xi) + (1 + z) B_2(\xi)\right) e^{\xi z} + \left(\xi\left(\xi z - s^{(2)}_1\right) C_2(\xi) + \left(s^{(2)}_1 - \xi z(3 - \xi z)\right) D_2(\xi) \right) e^{-\xi z} \right] J_0(\xi r)\, d\xi$$

$$\tilde{Q}_{33}^{(2)} = c_{44}^{(2)}\left(1+m_1^{(2)}\right)l_1^{(2)}\int_0^\infty \xi^2\left[\left(\xi A_2(\xi)+(2+\xi z)B_2(\xi)\right)e^{\xi z}+\left(\xi\left(s^{(2)}+\xi z\right)C_2(\xi)+\left(\xi z(3-\xi z)-s^{(2)}(2-\xi z)\right)D_2(\xi)\right)e^{-\xi z}\right]J_0(\xi r)d\xi$$

$$\tilde{Q}_{3r}^{(2)} = -\frac{c_{44}^{(2)}\left(1+m_1^{(2)}\right)}{\sqrt{n_1^{(2)}}}\int_0^\infty \xi^2\left[\left(\xi A_2(\xi)+(1+\xi z)B_2(\xi)\right)e^{\xi z}+\left(-\xi\left(s_0^{(2)}-\xi z\right)C_2(\xi)+\left(s_0^{(2)}-3\xi z-\xi^2 z^2\right)D_2(\xi)\right)e^{-\xi z}\right]J_1(\xi r)d\xi.$$

З урахування початкових умов (1), (2), а також інтегрального перетворення Ханкеля функцій розподілу зовнішнього навантаження $p(r), q(r)$:

$$p(r)=\int_0^\infty \xi\overline{p}(\xi)J_0(\xi r)d\xi,\ q(r)=\int_0^\infty \xi\overline{q}(\xi)J_1(\xi r)d\xi,$$

введення нових безрозмірних незалежних змінних $\rho=\frac{r}{a},\ t=\frac{z}{H_1}$ та змінної інтегрування $\beta=a\xi$, параметрів

$$\lambda=\frac{H_1}{a},\mu_1=\frac{H}{H_1},\delta=\frac{\sqrt{n_1^{(2)}}}{\sqrt{n_1^{(1)}}}\frac{c_{44}^{(1)}\left(1+m_1^{(1)}\right)}{c_{44}^{(2)}\left(1+m_1^{(2)}\right)},\chi=\frac{\sqrt{n_1^{(2)}}}{\sqrt{n_1^{(1)}}}\frac{m_1^{(1)}}{m_1^{(2)}},\kappa=\frac{c_{44}^{(1)}\left(1+m_1^{(1)}\right)l_1^{(1)}}{c_{44}^{(2)}\left(1+m_1^{(2)}\right)l_1^{(2)}},$$

та нових невідомих функцій параметру інтегрування β:

$$\overline{A}_1(\beta)=\frac{\beta^2}{a^4}A_1\left(\frac{\beta}{a}\right)ch\beta\lambda\mu_1,\overline{B}_1(\beta)=\frac{\beta}{a^3}B_1\left(\frac{\beta}{a}\right)ch\beta\lambda\mu_1,$$

$$\overline{A}_2(\beta)=\frac{\beta^2}{a^4}A_2\left(\frac{\beta}{a}\right)e^{\beta\lambda\mu_1},\overline{B}_2(\beta)=\frac{\beta}{a^3}B_2\left(\frac{\beta}{a}\right)e^{\beta\lambda\mu_1},\overline{C}_2(\beta)=\frac{\beta^2}{a^4}C_2\left(\frac{\beta}{a}\right)e^{-\beta\lambda\mu_1},\overline{D}_2(\beta)=\frac{\beta}{a^3}D_2\left(\frac{\beta}{a}\right)e^{-\beta\lambda\mu_1}$$

отримано функціональну систему відносно шести функцій $\overline{A}_1(\beta),\overline{B}_1(\beta),\overline{A}_2(\beta),\overline{B}_2(\beta),\overline{C}_2(\beta),\overline{D}_2(\beta)$:

$$\begin{pmatrix} N^{(2,4)} & 0 \\ M^{(4,4)} & P^{(4,2)} \end{pmatrix}\times\begin{pmatrix} \overline{A}_2(\beta) \\ \overline{B}_2(\beta) \\ \overline{C}_2(\beta) \\ \overline{D}_2(\beta) \\ \overline{A}_1(\beta) \\ \overline{B}_1(\beta) \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \overline{p}(\beta) \\ \overline{q}(\beta) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

де матриці $N^{(2,4)},M^{(4,4)},P^{(4,2)}$ мають такий вигляд:

$$N^{(2,4)}=\begin{pmatrix} 1 & 2+\beta\lambda & \left(s^{(2)}+\beta\lambda\right)e_1(\beta) & \left[\beta\lambda(3-\beta\lambda)-s^{(2)}(2-\beta\lambda)\right]e_1(\beta) \\ -1 & -1-\beta\lambda & \left(s_0^{(2)}-\beta\lambda\right)e_1(\beta) & -\left(s_0^{(2)}-3\beta\lambda-\beta^2\lambda^2\right)e_1(\beta) \end{pmatrix},$$

$$M^{(4,4)}=\begin{pmatrix} e_1(\beta) & (2+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) & s^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 & \beta\lambda\mu_1(3-\beta\lambda\mu_1)-s^{(1)}(2-\beta\lambda\mu_1) \\ -e_1(\beta) & -(1+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) & s_0^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 & -s_0^{(1)}+3\beta\lambda\mu_1+(\beta\lambda\mu_1)^2 \\ -e_1(\beta) & -\beta\lambda\mu_1 e_1(\beta) & -1+\beta\lambda\mu_1 & -\beta\lambda\mu_1(2-\beta\lambda\mu_1) \\ e_1(\beta) & (1+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) & \beta\lambda\mu_1-s_1^{(1)} & s_1^{(1)}-\beta\lambda\mu_1(3-\beta\lambda\mu_1) \end{pmatrix},$$

$$P^{(4,2)}=\begin{pmatrix} -\kappa\left(1+s^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 th\beta\lambda\mu_1\right) & -\kappa \\ \delta\left(th\beta\lambda\mu_1+\beta\lambda\mu_1\right) & \delta th\beta\lambda\mu_1 \\ 2+\beta\lambda\mu_1 th\beta\lambda\mu_1 & 1 \\ -\chi t\left(\left(1+s_1^{(1)}\right)th\beta\lambda\mu_1+\beta\lambda\mu_1\right) & -\chi th\beta\lambda\mu_1 \end{pmatrix},\ \text{äåe}_1(\beta)=e^{-\beta\lambda(1-\mu_1)}.$$

У роботі [2] знайдено асимптотичну поведінку розв’язку системи (3).

Проте, як виявляється, визначник цієї системи дорівнює нулю в точці $\beta=0$. Тому виникає необхідність аналітичної побудови розв’язку при $\beta\to 0$, оскільки без вирішення цього питання не можна навіть ствердно відповісти про існування та єдності розв’язку в околі нуля. Крім того, якщо вдасться вирішити це завдання, можна буде конструктивно підійти до наступного кроку – побудови числового розвязку задачі, розділивши усю область параметру інтегрування β на три ділянки: область в околі нуля,

область в достатній віддаленості від початку координат, та решту інтервалу, для якого задача розв'язана [1]. Розв'язок в нулі будемо шукати за правилом Крамера:

$$X(\beta)=\frac{\Delta_X(\beta)}{\Delta(\beta)}\left(X=\bar{A}_1(\beta),\bar{B}_1(\beta),\bar{A}_2(\beta),\bar{B}_2(\beta),\bar{C}_2(\beta),\bar{D}_2(\beta)\right). \quad (4)$$

Оскільки $\bar{q}(0)=0$, то усі визначники $\Delta_X(0)=0$, бо у них другий та четвертий рядки однакові. Тому при $\beta\to 0$ формула (4) дає невизначеність $\frac{0}{0}$. Для розкриття цієї невизначеності знайдемо головні члени визначників $\Delta(\beta)$ та $\Delta_X(\beta)$:

$$\Delta(\beta)\approx\kappa\left(s^{(1)}-1\right)\left(s^{(1)}-s_0^{(1)}\right)\beta\lambda\left(\delta\mu_1\left(1-s^{(1)}\right)+(1-\mu_1)\left(s_1^{(1)}+s_0^{(1)}\right)\left(3s^{(1)}+1\right)\right).$$

Аналогічно отримуємо визначники $\Delta_X(\beta)$, заміняючи у визначнику $\Delta(\beta)$ відповідний стовпець на стовпчик $\left(\bar{p}(\beta)\ \bar{q}(\beta)\ 0\ 0\ 0\ 0\right)^{\grave{O}}$. В результаті, використовуючи правило Крамера, отримаємо головні члени шуканих функцій:

$$\bar{A}_1(\beta)\approx j_1\bar{p}(\beta)+j_2\frac{\bar{q}(\beta)}{\beta\lambda},\bar{B}_1(\beta)\approx g_1\bar{p}(\beta)+g_2\frac{\bar{q}(\beta)}{\beta\lambda},$$

$$\bar{A}_2(\beta)\approx a_1\bar{p}(\beta)+a_2\frac{\bar{q}(\beta)}{\beta\lambda},\bar{B}_2(\beta)\approx b_1\bar{p}(\beta)+b_2\frac{\bar{q}(\beta)}{\beta\lambda},$$

$$\bar{C}_2(\beta)\approx c_1\bar{p}(\beta)+c_2\frac{\bar{q}(\beta)}{\beta\lambda},\bar{D}_2(\beta)\approx d_1\bar{p}(\beta)+d_2\frac{\bar{q}(\beta)}{\beta\lambda},$$

де $a_i,b_i,c_i,d_i,\ j_i,g_i\ (i=1,2)$ – деякі константи.

Отримані результати дають змогу стверджувати, що розв'язок системи (3) в нулі існує і єдиний. Крім того, в подальшому вони використовуються при числовій реалізації задачі при наближенні параметру інтегрування β до нуля. Очевидно, що питання визначення зони, яку можна вважати достатньо близькою до нуля, залежить від величини визначника $\Delta(\beta)$, який залежить як від констант, що визначають характеристики матеріалів плити та покриваючого її поверхневого шару, а також величини початкових напружень конструкції, так і від функцій зовнішнього навантаження $p(r)$ та $q(r)$.

Отже, при $\beta\to 0$ головні члени функцій $\bar{A}_1(\beta),\bar{B}_1(\beta),\bar{A}_2(\beta),\bar{B}_2(\beta),\bar{C}_2(\beta),\bar{D}_2(\beta)$ є лінійними комбінаціями $\bar{p}(\beta)$ та $\frac{\bar{q}(\beta)}{\beta\lambda}$.

Література

1. Рамський А.О. Зменшення напружень плити під дією зовнішнього навантаження за допомогою покриття її шаром із початковими напруженнями / А.О. Рамський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – № 3.
2. Рамський А.О. Асимптотика розв'язку задачі для плити, покритої шаром із початковими напруженнями / А.О. Рамський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – № 4.
3. Гузь А.Н. О представлении общих решений линеаризованной теории упругости несжимаемых тел // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1975. – № 12. – С. 1092–1096.
4. Гузь А.Н. О представлении общих решений линеаризованной теории упругости сжимаемого тела // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1975. – № 8. – С. 700–703.
5. Гузь А.Н., Рудницкий В.Б. Контактные задачи для упругих тел с начальными (остаточными) напряженими / А.Н. Гузь, В.Б. Рудницкий // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2004. – 682 с.

References

1. Ramskyi A.O. Zmenshennia napruzhen plyty pid diieiu zovnishnoho navantazhennia za dopomohoiu pokryttia yii sharom iz pochatkovymy napruzhenniamy / A.O. Ramskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – # 3.
2. Ramskyi A.O. Asymptotyka rozviazku zadachi dlia plyty, pokrytoi sharom iz pochatkovymy napruzhenniamy / A.O. Ramskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2017. – # 4.
3. Huz A.N. O predstavlenyy obshchykh reshenyi lynearyzovannoi teoryy upruhosty neszhymaemykh tel // Dokl. AN USSR. Ser. A. – 1975. – # 12. – S. 1092–1096.
4. Huz A.N. O predstavlenyy obshchykh reshenyi lynearyzovannoi teoryy upruhosty szhymaemoho tela // Dokl. AN USSR. Ser. A. – 1975. – # 8. – S. 700–703.
5. Huz A.N., Rudnytskyi V.B. Kontaktnye zadachy dlia upruhykh tel s nachalnymy (ostatochnыmy) napriazhenymy / A.N. Huz, V.B. Rudnytskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi : KhNU, 2004. – 682 s.

Рецензія/Peer review : 08.07.2017 р. Надрукована/Printed :27.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 656.7: 371.694

В.М. НЕДІЛЬКО, В.М. СТРАТОНОВ
Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету

ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕС ПРОВЕДЕННЯ ЕВАКУАЦІЇ З ПРИВОДНЕНОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА

Стаття присвячена актуальній проблемі вимушених посадок повітряних суден на водну поверхню. Одним із методів дослідження є проведення експертного опитування, яке застосовувалось нами для виявлення факторів, що мають найбільший вплив на процес евакуації з повітряного судна та на автономне виживання в умовах водного середовища. Для проведення експертного опитування нами був обраний метод Дельфі, в першу чергу, через те, що цей метод багаторівневий. На основі отриманих результатів буде спроектовано тренажерний комплекс та програма тренувань до нього. Факторам, що отримали від експертів високі оцінки, планується приділяти більше часу на тренуваннях та на теоретичних заняттях.

Ключові слова: *фактор, експертне опитування, приводнення, евакуація.*

V.M. NEDILKO, V. M. STRATONOV
Kirovohrad Flight Academy of the National Aviation University

DETERMINATION OF THE EFFECTS OF THE FACTORS ON THE EVAQUACY PROCESSING OF THE DITCHED AIRCRAFT

The article devoted to the issue of forced landings of aircraft on the water surface. One method of research is the expert survey aimed at identifying the factors that have the greatest influence on the evacuation of the aircraft and autonomous survival in the aquatic environment. For the expert survey we have been chosen Delphi method, primarily because this method multilevel. Based on the results will be designed fitness complex and a training program for him. Factors experts received high marks, plans to spend more time on training and theoretical studies.

Keywords: *factor, expert surveys, ditching, evacuation*

Вступ. Стрімкий розвиток авіації вимагає постійного вдосконалення існуючих засобів та методик підготовки екіпажів повітряних суден. Це характерно і для випадків аварійних посадок повітряних суден на водну поверхню.

Вимоги безпеки диктують свої умови при створенні тренажерних комплексів та формуванні вправ до них. Під час підготовки на існуючих тренажерах значна увага приділяється процесам покидання повітряного судна, яке приводнилося, та використанню аварійно-рятувального обладнання, що для збереження життя екіпажу та пасажирів є першочерговим [1].

На сьогодні найбільш сучасним та досконалим з огляду на можливості підготовки екіпажів літальних апаратів є модульний тренажер з відпрацювання евакуації (рис. 1). Даний тренажер, безперечно, має низку переваг перед статичними тренажерами, а саме:

- можливість керованого занурення кабіни тренажера у воду на задану глибину;
- можливість створення дезорієнтації, що викликана перевертанням кабіни тренажера навколо власної осі;
- відпрацювання покидання літального апарату за багатьма сценаріями: з застосуванням аварійних дихальних систем, використовуючи запасні виходи чи евакуацію на рятувальний пліт.

Рис. 1. Модульний тренажер для відпрацювання евакуації

У той же час, вплив навколишнього середовища, психологічних факторів, екстремальних умов, та вплив стану повітряного судна (ПС) після здійснення вимушеної посадки на подальшу евакуацію або зовсім не враховується, або враховується в недостатній мірі. Відсутність імітації вище зазначених факторів під час проведення підготовки знижує реалістичність моделі.

Постановка завдання. Саме з даних причин нами було прийняте рішення про проведення експертного опитування серед фахівців, що спеціалізуються на зазначеній проблематиці. Опитування проводилось з метою визначення факторів, що мають найсуттєвіший вплив на процес евакуації. Важливою умовою, щодо включення фактору до опитування, є його придатність до моделювання чи імітації на тренажерному комплексі.

Результати досліджень допоможуть організувати підготовку, де факторам, що отримали від експертів високі оцінки, приділялося б більше часу на тренуваннях чи на теоретичних заняттях.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів з поділом його на частини з відповідними назвами. Розподілення факторів на групи (етапи евакуації). На етапі формування анкети спершу було запропоновано близько 50 факторів. У процесі консультацій з експертами частина факторів були об'єднані, наприклад фактор – «небезпечні явища погоди». У результаті проведених консультацій для полегшення проведення опитування та збільшення надійності, із єдиного списку факторів було сформовано групи факторів, що відображають етапи проведення евакуації з ПС:

1. Початковий. Від моменту приводнення до початку евакуації. Процес переміщення від початкового місця знаходження до місця виходу з ПС.
2. Етап евакуації. Переміщення від виходу з борту ПС у воду або на плавзасіб.
3. Етап виживання. Етап знаходження у воді або на плавзасобі.

Для опитування була обрана кількісна шкала від 0 до 100 балів, та якісна (від 0 до 49 балів – незначний вплив на процес евакуації, від 50 до 69 – середній вплив, від 70 до 89 – високий, 90–100 балів – надвисокий вплив). Стобальна шкала була обрана тому, що під час обробки результатів можливо перевести оцінки в ранги. Деякі з факторів повторюються в різних групах (етапах) евакуації, наприклад небезпечні явища погоди чи паніка. Це зроблено з метою оцінки їх впливу на різних етапах евакуації.

Формування робочої групи експертів. Робоча група експертів складалась з 18–и експертів. Це військовослужбовці 15-ї бригади транспортної авіації «Блакитна стежка» [2]. Всі експерти мають вищу освіту та закінчували профільні авіаційні ВНЗ (Харківський національний університет повітряних сил; Державну льотну академію України). Експерти мають регулярну авіаційну практику, деякі – велику кількість годин нальоту (550 та 1500 годин відповідно) та досвід польотів над акваторіями Чорного, Азовського та Балтійського морів. Двоє експертів мають досвід польотів через Атлантичний океан. Військовослужбовці, що брали участь в опитуванні, мають військові звання до підполковника включно, посади від штурмана ПС до посади командира загону, та досвід польоту на наступних типах ПС: Як–52, Л–39, Ан–26, Ан–30, Ан–2, НАРП–1.

Також експертами були пілоти цивільної авіації. Опитування проводилося серед пілотів авіакомпаній, що базуються на території України. Зокрема були помічники командирів ПС (другі пілоти), що здійснюють польоти на таких ПС, як В737–300 та А320. Третина від усіх польотів виконується над водною поверхнею. Кількість годин нальоту у опитаних експертів від 500 до 1100.

Третю частину від робочої групи становили фахівці, що спеціалізуються на питаннях пошуку та рятування. Це викладачі Кіровоградської льотної академії Національного авіаційного університету, що мають досвід викладання дисциплін, суміжних з проблематикою, близько 20 років. Двоє експертів закінчили ВВАУЛ (вище військове авіаційне училище льотчиків) – Чернігівське та Ворошиловградське, та мають досвід польотів на цивільних ПС Ан–26, Ан–12, а також на військових ПС: Су–7 БКЛ та Су–24, над водоймами, включаючи Тихий океан.

Опис методу експертних оцінок. Для проведення експертного опитування нами був обраний метод Дельфі, в першу чергу, через те, що цей метод багаторівневий [3], зокрема очний метод опитування.

Анкетування проводилося з кожним експертом індивідуально, що виключає явище конформізму та залежності від думки більш авторитетних людей у групі. При визначенні чисельності експертів у складі робочої групи ми керувались роботою, де зазначено, що оптимальна кількість експертів становить від 11 до 21 [4]. Нами обрана робоча група у складі 18-и експертів, що також не суперечить прагматичному підходу визначення кількості експертів.

Перед проведенням безпосередньо самого опитування, майбутні експерти оцінили свою компетентність щодо даної проблеми. Коефіцієнт компетентності складався з середнього показника двох складових: коефіцієнту інформованості та ступеню аргументації оцінок експертів.

Результати надано у табл. 1.

Обробка результатів експертного опитування проходила згідно з алгоритмом:

1. Визначення середнього значення оцінок експертів (1):

$$R_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{m} R_i}{m} \tag{1}$$

2. Визначення узгодженості оцінок експертів. Визначення дисперсії для кожного з факторів за формулою виправленої вибіркової дисперсії (2):

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^{m} (R_{cp} - Ri)^2}{m-1} \tag{2}$$

Таблиця 1

Компетентність експертів

№ Експерта	Значення коефіцієнту		
	Інформованості	Аргументації	Компетентності
1.	0,70	0,80	0,75
2.	1,00	1,00	1,00
3.	0,80	0,90	0,85
4.	0,70	0,80	0,75
5.	0,90	0,90	0,9
6.	0,90	0,70	0,80
7.	0,8	0,7	0,75
8.	0,8	0,7	0,75
9.	0,9	0,7	0,8
10.	0,9	0,7	0,8
11.	0,8	0,8	0,8
12.	0,7	0,85	0,775
13.	0,8	1	0,9
14.	0,9	0,8	0,85
15.	0,8	1	0,9
16.	0,9	0,85	0,875
17.	0,8	1	0,9
18.	1	0,85	0,925

3. Визначення середньоквадратичного відхилення для кожного із факторів (3):

$$\sigma_i = \sqrt{D_i} \tag{3}$$

4. Визначення коефіцієнта варіації для кожного з факторів (4):

$$\nu_i = \frac{\sigma_i}{R_{cp_i}} \cdot 100\% \tag{4}$$

Кінцеві висновки робили після визначення узгодженості по всій сукупності факторів. Для цього відшукували коефіцієнт конкордації *W* за Кендаллом, тобто узагальнений коефіцієнт рангової кореляції для групи, що складається з m експертів [5]. Так як експерти оцінювали фактори у бальній системі, для визначення коефіцієнту конкордації ми згідно отриманих оцінок ранжували фактори у порядку спадання. Також були випадки, коли експерт присвоював різним факторам однакову кількість балів. Кінцеві висновки щодо узгодженості були вирахувані за формулами (5, 6):

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^{m} T_j} \tag{5}$$

$$T_j = \frac{1}{12} \sum_{T_j} (t_j^3 - t_j) \tag{6}$$

де t_j – кількість однакових рангів в *j*-му ряду.

Коефіцієнт конкордації для етапу №1 становив – 0,977; для етапу №2 – 0,9395; для етапу №3 – 0,961. На основі наведених коефіцієнтів можна зробити висновок, що узгодженість думок експертів висока та результат є достовірним (згідно з розподілом хі-квадрату).

Результати дослідження. У результаті опитування отримано систему переваг експертів згідно з етапами:

Етап №1:

1. Положення ПС після приводнення – 93.
2. Вода, що швидко прибуває на борт ПС – 90.
3. Проблема (неможливість) відкриття виходів з ПС – 88,65.
4. Наявність вогню на борту ПС – 83,36.
5. Відсутність знань про процес евакуації – 83.
6. Відсутність знань плану евакуації та конструкції ПС – 83.
7. Відсутність знань про місця розташування та порядок приведення в робочий стан бортового аварійно-рятувального обладнання – 82,1.
8. Паніка на борту ПС – 81,1.
9. Дезорієнтація – 78,05.
10. Загромаджені проходи – 77,77.
11. Обмежена видимість (дим) – 77,32.

12. Потреба евакуації поранених – 73,8.
13. Відсутність досвіду тренувань – 72,87.
14. Відсутність працюючого аварійного освітлення – 71.
15. Відсутність людини, яка б керувала евакуацією – 66,52.
16. Наявність та руйнування пакування небезпечних вантажів, потрапляння яких на відкриті ділянки шкіри викликає ушкодження – 60.
17. Несприятливі психологічні умови (крики постраждалих, сліди крові) – 56,94.

Етап №2:

1. Положення ПС після посадки – 86,11.
2. Хвилі, морська піна, течії – 80.
3. Стан виходу з ПС – 78.
4. Відсутність інструктажу з питань евакуації з ПС у воду або на плавзасіб – 77,06.
5. Попередній досвід приводнення, або досвід тренувань, що моделюють приводнення – 74,58.
6. Наявність на місці приводнення часткового льоду – 73.
7. Небезпечні явища погоди – 71,66.
8. Відсутність людини, яка б керувала евакуацією – 68,23.
9. Обмежена видимість (дим, туман, нічний час) – 67,77.
10. Неправильне положення рятувального плоту – 57,22.
11. Двигуни, що працюють (шум, розворот фюзеляжу, гвинти, що обертаються) – 53,05.
12. Глибина та рельєф дна – 41.66.

Етап №3:

1. Низька температура води та повітря – 95.
2. Бортове аварійно-рятувального обладнання відсутнє або пошкоджене при посадці – 93,47.
3. Невміння використовувати аварійно-рятувальне обладнання (засоби сигналізації, радіостанції, НАЗ) – 89,14.
4. Наявність поранених, та/або людей, що не вміють плавати – 85.
5. Велика відстань від місця авіаційної події до суші – 83,47.
6. Наявність хвиль, морської піни, течій – 83.
7. Невміння орієнтуватися на просторі – 82,5.
8. Незнання місця свого знаходження – 81,52.
9. Паніка – 80,1.
10. Небезпечні явища погоди – 79,4.
11. Відсутність інструктажу з питань виживання в автономних умовах – 78,7.
12. Незнання основ надання медичної допомоги та запобігання захворювань – 78,47.
13. Попередній досвід приводнення, або досвід тренувань, що моделюють приводнення – 77,21.
14. Незнання технік плавання – 76,6.
15. Наявність хижих морських тварин – 71,4.
16. Обмежена видимість (перешкоджає орієнтуванню, може спровокувати морську хворобу, якщо буде неможливо орієнтуватися на горизонт) – 66,66.
17. Відсутність людини, яка б керувала групою – 66,40.
18. Глибина та рельєф дна водойми – 47,5.

На підставі проведеного дослідження встановлена необхідність врахування дії факторів на процес проведення евакуаційних дій. Нами запропоновано внести наступні конструктивні зміни до облаштування місця проведення тренувань:

- встановлення промислових вентиляторів або іншого обладнання здатного нагнітати повітря, з метою імітації вітру; вправи з застосуванням даного обладнання доцільно проводити на всіх етапах підготовки, особливо при відпрацюванні евакуації на рятувальний пліт, евакуації за допомогою лебідки гелікоптера та для створення умов шторму;
- встановлення спеціальних конструкцій (об’ємний предмет, що контрольовано занурюється у воду), що створюють штучне хвилювання водної поверхні. Імітація хвиль необхідна при проведенні тренувань у закритому приміщенні та завершальних етапах підготовки;
- встановлення аудіо-обладнання для відтворення звуків дощу, грому, хвилювання водної поверхні, пошукового гелікоптеру та звуків, що характерні для людей, що знаходяться у шоковому стані (крик, плач);
- встановлення парогенераторів та димогенераторів, для імітації умов зі зниженою видимістю (димка, туман, горіння розлитого авіапалива та ін.);
- встановлення світлового обладнання, що імітуватиме прожектор пошуково-рятувального гелікоптеру та спалахи блискавки;
- встановлення проекційного екрану (та спрямованих на нього проекторів), який би розміщувався у межах басейну та імітував умови, що характерні для відкритого моря.

На рис. 1 графічно зображено імітаційне обладнання, що встановлене поряд з басейном.

Аналізуючи фактори, що згідно з оцінками експертів мають високий та надвисокий вплив на успішність проведення евакуації, нами окрім встановлення додаткового технічного обладнання для створення реалістичної обстановки рекомендується ввести до курсу підготовки вправи, що враховують «екстремальні», непередбачувані умови, як-то деформований чи заклинений вихід з ПС, пошкоджене чи

відсутнє бортове аварійно-рятувальне обладнання, а також наявність поранених людей, яких необхідно транспортувати, чи людей, що знаходяться у шоковому стані.

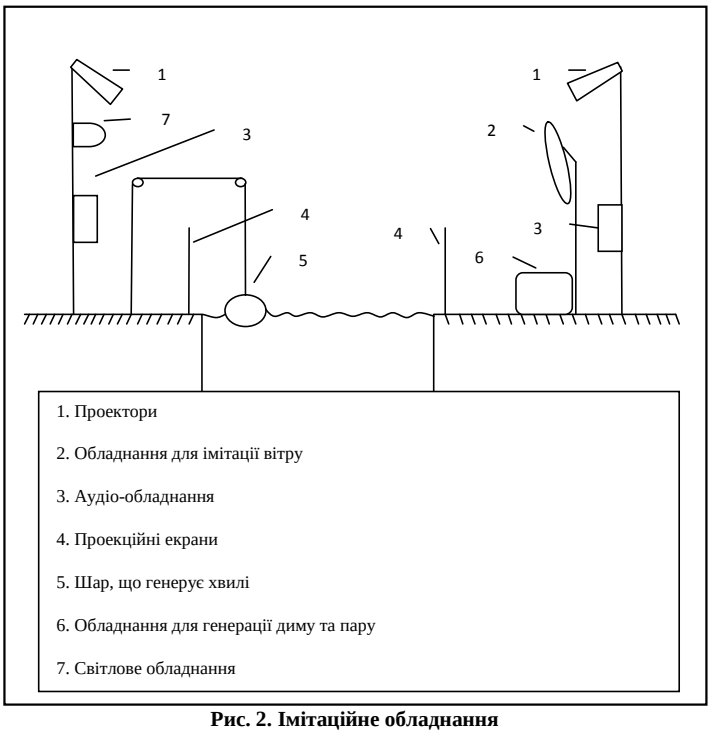


Рис. 2. Імітаційне обладнання

Висновки та рекомендації. Провівши аналіз основних існуючих засобів підготовки льотних екіпажів до дій в умовах приводнення, був зроблений висновок, що незважаючи на мультифункціональність тренажерів, є фактори, вплив яких не врахований, або врахований у недостатній мірі. Виходячи з цього, нами проведене експертне опитування, результатом якого стало розподілення факторів на групи відповідно до етапів евакуації, та надання кожному з факторів оцінок, що відображають їх вплив на успішність евакуаційних дій. Також нами рекомендовано застосовувати імітаційне обладнання, за допомогою якого можливо змоделювати умови навколишнього середовища.

Література

1. Кропивницький: Міжнародна акціонерна авіаційна компанія «УРГА», 1993–2017 [Електронний ресурс] // Urga.com.ua : інтернет-портал. – Режим доступу : http://urga.com.ua/ua/kursy-povysheniya-kvalifikacii.

2. Mil.gov [Електронний ресурс] : [Офіційний веб-сайт]. – Київ : Міністерство оборони України, 2001–2017. – Режим доступу : http://www.mil.gov.ua/news/2015/03/17/70-rokiv-viddanoi-lotnoi-sluzhbi--/

3. Мирмович Э. Анализ проблемы поддержки выработки решений на действия в кризисных ситуациях в условиях неопределенности / Э. Мирмович, А. Жаренов // Технологии гражданской безопасности. – 2007. – С. 88–95.

4. Постников В. Анализ подходов к формированию состава экспертной группы, ориентированной на подготовку и принятие решений / В. Постников. // Наука и образование : научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – С. 333–346.

5. Бююль А. SPSS – искусство обработки информации, анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей / А. Бююль, П. Цефель. – СПб : Diasoft, 2002. – 608 с.

References

1. Kropyvnytskyi: Mizhnarodna aktsionerna aviatsiina kompaniia «URHA», 1993–2017 [Elektronnyi resurs] // Urga.com.ua : internet-portal. – Rezhym dostupu : http://urga.com.ua/ua/kursy-povysheniya-kvalifikacii.

2. Mil.gov [Elektronnyi resurs] : [Ofitsiinyi veb-sait]. – Kyiv : Ministerstvo oborony Ukrainy, 2001–2017. – Rezhym dostupu : http://www.mil.gov.ua/news/2015/03/17/70-rokiv-viddanoi-lotnoi-sluzhbi--/

3. Myrmovych E. Analyz problemy podderzhky vyrabotky reshenyi na deistvyia v kryzysnykh sytuatsyiakh v uslovyiakh neopredelennosty / E. Myrmovych, A. Zharenov // Tekhnolohyy hrazhdanskoi bezopasnosty. – 2007. – S. 88–95.

4. Postnykov V. Analyz podkhodov k formyrovanyiu sostava ekspertnoi hruppy, oryentyrovannoi na podhotovku y pryniatye reshenyi / V. Postnykov. // Nauka y obrazovanye : nauchnoe yzdanye MHTU ym. N.E. Baumana. – 2012. – S. 333–346.

5. Biuiul A. SPSS – yskusstvo obrabotky ynformatsyy, analyz statystycheskykh dannykh y vosstanovlenye skrytykh zakonomernostei / A. Biuiul, P. Tsefel. – SPb : Diasoft, 2002. – 608 s.

Рецензія/Peer review : 21.09.2017 р. Надрукована/Printed :32.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф.. Осадчий С.І.

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК: 687.016.(075)

А.Л. СЛАВІНСЬКА
Хмельницький національний університет

МЕТОДОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ОДЯГУ

В статті викладені методичні основи застосування інформаційно-комунікативних технологій в етапах конструкторської підготовки документації для розробки експериментального зразка. Розроблена структурна модель контролю якості вхідних і вихідних параметрів проектної документації. запропонована номенклатура показників якості для локальної системи оцінки якості верхнього одягу на основі моніторингу коефіцієнтів вагомості групових і одиничних показників.

Ключові слова: технологія, конструкторська підготовка, проектна документація, номенклатура показників, якість, локальна система, вагомість, модель, верхній одяг.

A.L. SLAVINSKA
Khmelnytsky National University

METHODOLOGY OF MONITORING THE INFORMATIONAL AND COMMUNICATIONAL TECHNOLOGIES OF DESIGN PROCESS IN APPAREL INDUSTRY

The main objective of the study is to develop a method of the situation analysis of the design documentation that is based on the use of the local system of quality evaluation. Logical definition of the task of managing the stages of searching design is formed. According to it a complex algorithm of address management of design documentation quality was developed. Structural and informational model of quality formation of the input and output elements of the system "design documentation – garment" was developed. In addition, the nomenclature of quality indexes was presented as an information model, which takes into account structural levels of the indexes' classification features in the hierarchical chart. Normalized weighting factors of the quality indexes of outerwear allow monitoring the garment quality by controlling the mistakes that might occur during the garment design process.

Keywords: technology, design process, design documentation, nomenclature of indexes, quality, local system, weight, model, outerwear.

Вступ

Концепція інтенсифікації процесу розробки і постановки продукції на виробництво визначається співвідношенням структури потреб і попиту споживачів та виробничо-технологічними можливостями підприємства.

Швейний виріб та процес його виготовлення відноситься до складної технічної системи, яка містить від 1000 до 10000 елементів, що потребує навиків оцінювання, інтерпретації та синтезу інформації у ході інженерної підготовки виробництва. Конструкторська підготовка є визначальною у комплексі заходів, спрямованих на створення нових чи вдосконалення існуючих видів продукції. Помилки проектування подовжують тривалість не лише конструкторської, але й технологічної підготовки, оскільки 50% якості майбутнього виробу закладається в конструкторській документації.

Застосування моделі «адресного проектування» створює передумови для базового способу виконування конструкторських документів. Наявність одного базового основного конструкторського документа скорочує алгоритм комплексної оцінки якості, актуальним в якому є регламентація контрою якості етапів проектування документа.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сукупність характеристик властивостей продукції визначає її якість, яка для швейних виробів побутового призначення регламентована стандартом 4.45-86 [1]. Стандарт ДСТ України 2027-92 [2] регламентує терміни і визначення ознак швейних і трикотажних виробів. Класифікаційні ознаки видів асортименту нормативно упорядковані технічним описом основних ознак зовнішнього вигляду, де вказані вид за предметним переліком, стать, умови експлуатації, опис основних ознак конструкції [3, 4]. Логістична координація конструктивно-технологічних ознак виробу [5] створює передумови структурного перебору властивостей на рівні диференціації в конструкторській документації (КД): категорія, предмет, технологія, показник [6].

Принципи формоутворення конструкції: ефективність, ергономічність, економічність, технологічність, конструктивність визначають маршрут упорядкованої комбінації групових елементів предмету на засадах адресності властивостей споживчих вподобань і забезпечують гнучкість типового представника для перебудови виробництва [7].

Опис властивостей в кваліметрії [8] характеризується трьома числовими параметрами: числовим значенням (абсолютним показником); оцінкою (відносним показником), яка характеризує міру задоволення в цій властивості; вагомістю, яка визначає частку важливості властивості в сукупності властивостей якості.

Методичний підхід до застосування «дерева показників» у системі показників якості швейної продукції базується на двох підсистемах: споживчі та техніко-економічні показники, які є відкритими на

рівні одиничних показників якості [9].

Дослідження [10] підтверджують, що управління якістю одягу на основі замкненої системи регулювання із заперечливим зворотнім зв'язком у процесах проектування є визначальним для формування якості майбутньої продукції та економічної ефективності її виробництва і споживання.

Мета і завдання дослідження

Мета дослідження – розробка методики ситуаційного аналізу конструкторської документації на основі застосування локальної системи оцінки якості.

Завдання дослідження:

- розробка структурної моделі зв'язку вхідних і вихідних елементів проектування конструкторської документації;
- розробка алгоритму управління якістю адресного проектування нових моделей одягу;
- розробка номенклатури локальної системи показників якості для контролю даних базового конструкторського документа.

Виклад основного матеріалу

Адресне моделювання і конструювання на основі концептуально-функціональної моделі типового проекту серії моделей у формі систематизованого асортиментного ряду САР відповідає вимогам інтенсивного оновлення і зростанню випуску швейної продукції.

За ДСТУ 2321:2003 [10] проектна конструкторська документація містить технічну пропозицію, ескізний проект і технічний проект. 80% якості майбутнього виробу закладається на стадіях технічної пропозиції та ескізного проекту [4].

Процес проектування САР доцільно розглянути у вигляді системи, що складається з двох підсистем: керуючої – 1 і керованої – 2 [4] (рис. 1).

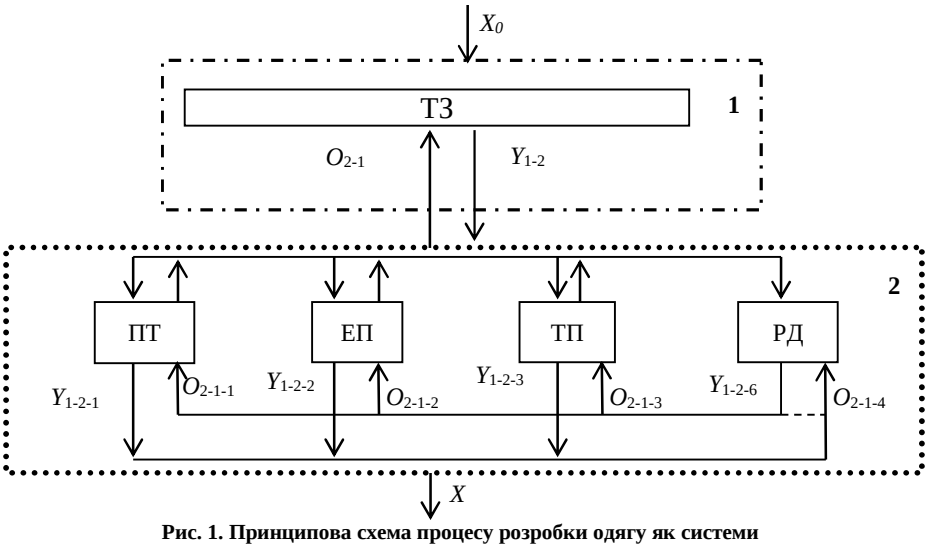


Рис. 1. Принципова схема процесу розробки одягу як системи

Керуючою підсистемою 1 є технічне завдання ТЗ, яке не належить до конструкторських документів, проте входить як етап у технічну пропозицію (ПТ).

Для добору загальної ознайомчої інформації $O_{2\text{-}1}$, відповідно до вимоги створення технологічно однорідних моделей САР на основі типової базової конструкції ТБК, необхідно враховувати дві умови:

- дотримання функціональної типізації конструкції за числом конструктивних отворів для визначення базового типу: пальто, пелерина, спідниця, штани, комбінезон;
- збереження геометрії силуетних профілів основної форми в членуваннях деталей ТБК.

На другому етапі стадії розробки технічної пропозиції виконується порівняння, оцінка і вибір оптимального варіанту узагальненої моделі конструктивного прототипу. Для цього використовують ознайомчу інформацію $O_{2\text{-}1\text{-}1}$, яка базується на синергетичних зв'язках складових системи «модель виробу – цільова функція» [5].

Нормативна інформація щодо показників якості швейних виробів, наведеної в [1], дозволяє регулювати обсяг $O_{2\text{-}1\text{-}2}$ в оптимальних варіантах принципових схем композиційного і конструктивного рішення для умови збереження геометрії силуетних профілів ТБК.

Загальна керуюча дія $Y_{1\text{-}2}$ на виході представлена характеристикою найкращих багатомірних гіпотетичних образів основних типів одягу у формі ТЗ.

Окремі керуючі впливи $Y_{1\text{-}2\text{-}1}$ (для контролю якості технічної пропозиції) та $Y_{1\text{-}2\text{-}2}$ (для контролю якості ескізного проекту) визначають загальний рівень функціональності і технологічності кінцевої продукції.

Послідовність управління потоками вхідної і вихідної інформації на стадіях пошукового проектування в КПВ наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Комплексний алгоритм адресного управління якістю проектної конструкторської документації на стадіях пошукового проектування

Стадія проектування	Вхідна інформація O_i	Вихідна інформація Y_i
Технічна пропозиція ПТ: Етап – технічне завдання ТЗ Етап – технічна пропозиція ПТ	$O_{2\text{-}1}$: Державні стандарти, технічні умови, планові показники перспективного рівня якості базової моделі $O_{2\text{-}1\text{-}1}$: базові показники якості типового представника асортименту; характеристика моделей САРу	$Y_{1\text{-}2}$ оптимальні вимоги і базові показники якості функціональності виробу; попередня оцінка моделей НАР $Y_{1\text{-}2\text{-}1}$ – результати аналізу моделей САР; варіанти композиційно-конструктивних рішень (ККР); попередня оцінка адресності застосування ККР
Ескізний проект ЕП	$O_{2\text{-}1\text{-}2}$: оптимальні варіанти принципових схем ККР	$Y_{1\text{-}2\text{-}2}$ – ескізи серії моделей-пропозицій; експериментальний зразок базової моделі; оптимізація показників базової моделі; оцінка естетичного рівня моделей серії; попередня оцінка технологічної однорідності моделей серії

Функціональні властивості одягу, як виробу або сукупності виробів, які вдягає людина [2] характеризують споживчі вимоги, показники яких регламентовані ГОСТ 4.45-86. Технологічні властивості виробу характеризують техніко-економічні вимоги щодо виготовлення виробу, які регламентовані стандартами [6, 11].

Адресність проектування САР забезпечує дотримання взаємозв'язків у принципах формоутворення конструкції: ефективність – з асортиментним видом, ергономічність – з морфологічним типом споживача, технологічність – з типовою технологією, економічність – з відповідними матеріалами, конструктивність – з методами конструювання. Синергетичні зв'язки станів конструкції з принципами визначають зміст вхідних і вихідних елементів системи.

Структурна модель зв'язку вхідних і вихідних елементів адресного контролю якості системи «виріб – проектна документація» наведена на рис. 2.

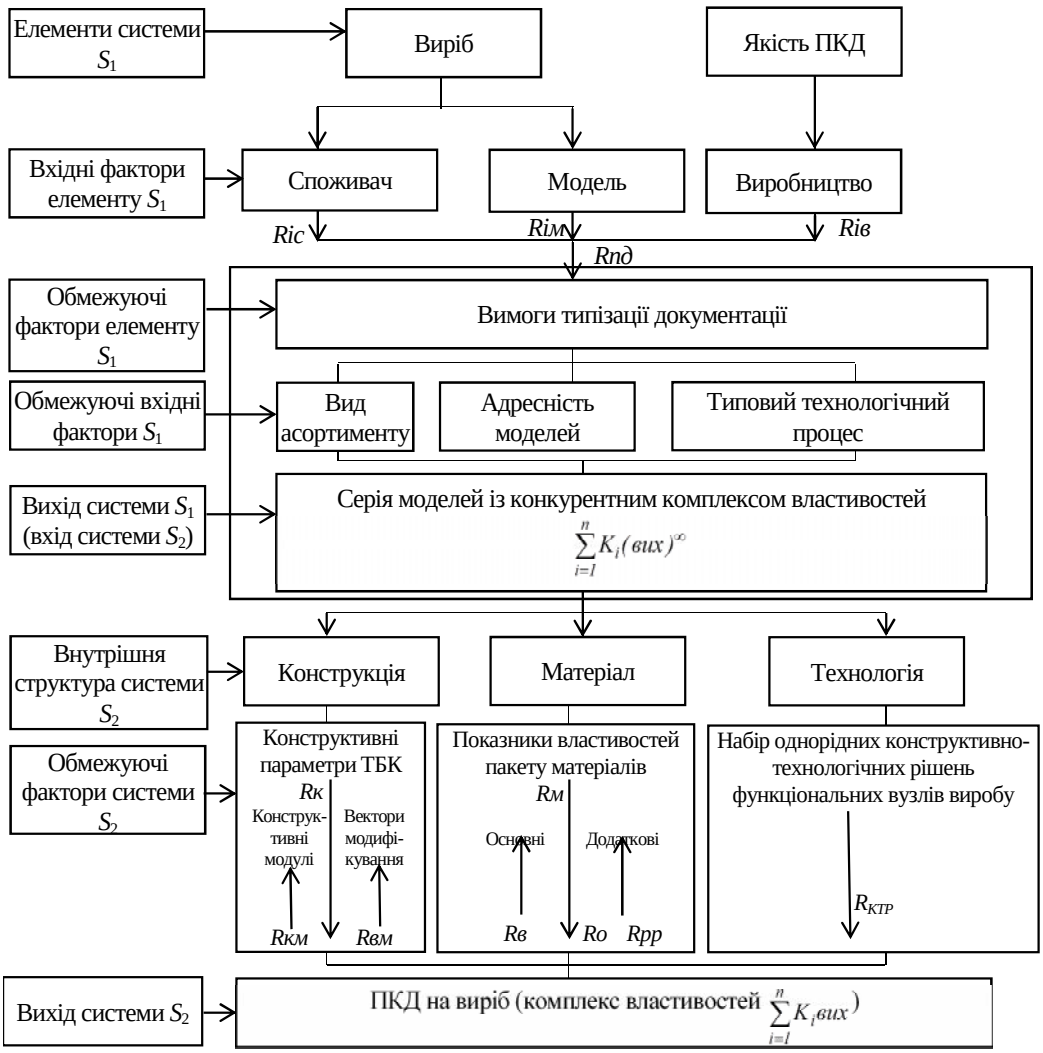


Рис. 2. Структурна модель формування якості вхідних S_1 та вихідних S_2 елементів системи «проектна документація – виріб» для серії моделей

Вхідними факторами елемента S_1 є споживач, гіпотетична модель виробу, виробництво, від яких утворюються інформаційні зв'язки (*Ric*, *Rім*, *Rів*), представлені у вигляді нормативних вимог до проектної документації *Rпд*.

Обмежуючими факторами S_1 є вимоги типізації документації, які обмежують інформаційні зв'язки *Ric*, *Rім*, *Rів*, перетворюючи їх у розмірні зв'язки *Rгд*, а саме у конкретні величини асортиментних модельних і технологічних характеристик, які можуть бути використані у процесі адресного проектування серії моделей – $\sum K_i^n(вих)^\infty$.

Необхідний комплекс властивостей ПКД досягається лише за рахунок комбінаторного взаємозв'язку параметрів елемента S_2 «матеріал – конструкція» за допомогою параметра технологія при виборі режимів обробки однорідних КТР вузлів. Взаємодія параметрів елементів S_2 обумовлює утворення зв'язків $R_{ПКД}$ у вигляді показників властивостей матеріалів (*Rм*), конструктивних (*Rк*:*RкмRвм*) та технологічних ($R_{КТР}$) параметрів.

Сучасний ринок індустріально розвинених країн наповнений продукцією, яка задовольняє усі явні, очевидні вимоги, тому при збуті перевагу отримує продукція, яка задовольняє приховані переваги. 100-бальна система показників якості одягу, яка розроблена з урахуванням загального алгоритму, прийнятого у кваліметрії і специфічних особливостей рівневої структури показників якості, дозволяє обрати одноваріантне рішення задачі з подальшим поверненням і однотипним вирішенням для всіх оцінюваних варіантів проектних рішень.

Згортання показників якості 3-го, 4-го рівнів ієрархічної структури загальної системи дозволяє виділити локальну систему оцінки якості [10].

Для локалізації ієрархічних рівнів оцінки якості необхідно врахувати наступні вимоги:

- єдність класифікаційних ознак, за якими будь-який комплексний показник ділиться на *n* показників нижчого рівня;
- обмеження (до п'яти-семи) числа показників, що входять в однорідні групи, які визначають показники якості вищого рівня;

Таблиця 2

Інформаційна модель структурних рівнів номенклатури показників якості швейних виробів

Класифікаційні ознаки показника	Код структурного рівня	Найменування показника якості	Розмірність	Метод визначення
Інтегральний	0	Якість в цілому	Приведені	Розрахунковий
Комплексний	1	Споживчі	Приведені	Комбінований
Груповий	1.1	Призначення	Бал	Соціологічний
Одиничний	1.1.1	Відповідність виробу основному призначенню	Бал	Експертний
Одиничний	1.1.2	Відповідність виробу розмірній і повнотно-віковій групі людини	Бал	Експертний
Одиничний	1.1.3	Відповідність виробу сезону, сфері застосування та умовам експлуатації	Бал	Експертний
Одиничний	1.1.4	Відповідність застосовуваних матеріалів, оздоблень і фурнітури призначенню виробу	Бал	Експертний
Груповий	1.2	Естетичні	Бал	Органолептичний
Одиничний	1.2.1	Відповідність виробу сучасному напряму моди	Бал	Експертний
Одиничний	1.2.2	Рівень оброблення і оздоблення виробу	Бал	Експертний
Одиничний	1.2.3	Чіткість і виразність виконання товарних знаків і ярликів	Бал	Експертний
Груповий	1.3	Ергономічні		Експертний
Одиничний	1.3.1	Статична відповідність	Бал	Органолептичний
Одиничний	1.3.2	Динамічність	Бал	Експертний
Одиничний	1.3.3	Зручність користування	Бал	Органолептичний
Груповий	1.4	Надійності		Інструментальний
Одиничний	1.4.1	Можливості хімічного чищення, прання, прасування	Бал	Експертний
Одиничний	1.4.2	Міцність з'єднання деталей	Бал	Експертний
Комплексний	2	Техніко-економічні	Приведені	Інструментальний
Груповий	2.1	Конструктивне наслідування	Коефіцієнт	Комбінований
Одиничний	2.1.1	Ступінь застосування (уніфікації) складових частин	Коефіцієнт	Розрахунковий
Одиничний	2.1.2	Ступінь повторюваності складових частин	Коефіцієнт	Розрахунковий
Одиничний	2.1.3	Ступінь перспективного використання (новизни)	Коефіцієнт	Розрахунковий
Груповий	2.2	Технологічна раціональність	Приведені	Комбінований
Одиничний	2.2.1	Ступінь мінімізації числа деталей і з'єднань	Коефіцієнт	Розрахунковий
Одиничний	2.2.2	Ступінь застосування паралельно-послідовних методів оброблення і складання	Коефіцієнт	Розрахунковий
Одиничний	2.2.3	Ступінь механізації і автоматизації процесу	Коефіцієнт	Розрахунковий
Груповий	2.3	Матеріаломісткість	Приведені	Інструментальний
Одиничний	2.3.1	Ступінь використання матеріалів	Коефіцієнт	Розрахунковий
Одиничний	2.3.2	Критеріальний рівень економічності моделі	Коефіцієнт	Розрахунковий

- виключення повторень одних і тих же показників на різних рівнях ієрархічної структурної схеми;
- виділення достатньо близької кількості ($p \approx q \approx l$) показників нижче розташованого рівня у кожному показнику, що входить в однорідну групу на більш високому рівні ієрархічної схеми.

В основу розробки ієрархічної структури схеми закладені показники якості швейних виробів за ГОСТ 4.45-86, як такі, що відповідають перерахованим вимогам і характеризують споживчі показники функціональних властивостей.

Ефективність технологічних властивостей проектної конструкторської документації визначають техніко-економічні показники: уніфікації, трудомісткості і матеріаломісткості [4].

Алгоритм розробки локальної системи оцінки якості на стадії проектування містить три етапи: побудова ієрархічної структурної схеми; визначення коефіцієнтів вагомості m_i показників якості; вибір методу оптимізації оцінок окремих показників.

Для організації ієрархічних рівнів підсистем локальної системи оцінки якості розроблено інформаційну модель номенклатури показників якості (табл. 2).

Інформаційна модель характеризує наступні рівні: інтегральний (загальний) показник у вигляді однієї системи; комплексний показник у вигляді двох підсистем; груповий показник – у вигляді семи груп; одиничний показник – у вигляді двадцяти окремих показників. Графічна модель системи представлена на рис. 3.

Рис. 3. Ієрархічна структурна схема показників локальної системи оцінки якості одягу

Визначення коефіцієнтів вагомості показників 1-го і 2-го рівнів для швейних виробів верхнього одягу базується на нормованих величинах джерел [9, 12]. Розрахунок усереднених нормованих показників, які приймаються базовими для оцінки рівня якості експериментального зразка, виконують за формулою:

$$\overline{m}'_{ij} = \sum_{j=1}^{N} m_{ij} / N, \qquad (1)$$

де m_{ij} – нормований показник якості виробу в групі верхнього одягу;
N – число швейних виробів у групі верхнього одягу.

В процедурі нормування коефіцієнтів вагомості необхідно дотримуватись умови $\sum_{j=1}^{n} m'_{ij} = 1$, приведення до вищого нульового рівня (n=0, 1, 2, 3).

Нормовані коефіцієнти вагомості показників якості групи верхнього одягу наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Середні значення нормованих коефіцієнтів вагомості показників якості верхнього одягу 1-го та 2-го рівнів

Показники якості	Нормовані коефіцієнти вагомості показників			Розбіжність, %
	експертні [9]	за золотим перетином	середні	
Споживчі, в тому числі:	0,652	0,62	0,636	2,5
призначення	0,213	0,203	0,208	2,3
естетичні	0,161	0,152	0,157	2,5
ергономічні	0,145	0,138	0,142	2,1
надійності	0,133	0,126	0,129	3,0
Техніко-економічні, в тому числі:	0,348	0,38	0,364	4,6
конструктивне наслідування	0,112	0,122	0,117	4,5
технологічна раціональність	0,124	0,136	0,130	4,8
матеріаломісткість	0,112	0,122	0,117	4,5
Загальний рівень	1,0	1,0	1,0	2,1-4,8

Довірча вірогідність оцінки узгодження експертної і усередненої систем вагомості групових і комплексних показників якості складає 0,95. Це підтверджує доцільність використання усереднених значень коефіцієнтів вагомості як базових для контролю рівня якості експериментального зразка по етапах КПВ.

Стабільність збуту продукції забезпечує врахування індивідуальних вимог щодо асортиментного виду однакового призначення у вигляді модифікацій базової моделі. Оптимальне число модифікацій за рекомендаціями [6] три-п'ять серійних моделей, як розгалуження САР.

Для визначення одиничних показників доцільно використати спосіб згортання окремих одиничних показників у групових показниках 100-бальної системи оцінки якості. Після згортання загальне число відносних одиничних показників якості визначають умови задачі: $i = \overline{1,20}$. Загальне число груп комплексної оцінки визначають умови задачі: $I = \overline{1,10}$ (сім груп, дві підсистеми і одна система оцінки якості в цілому).

Формалізація задачі визначення загального показника виконана за формулою:

$$K_i = Q_i q_i^б, \quad i = \overline{l,m} \tag{2}$$

де Q_i – абсолютний показник якості;

q_i – нормований коефіцієнт базового показника якості;

l – нижня межа групи;

m – верхня межа групи.

В табл. 4 наведені значення l і m для розрахунку комплексних показників локальної системи оцінки якості: з урахуванням рівнів за рис. 3.

Таблиця 4

Значення l і m для розрахунку комплексних показників десяти груп

Номер групи	l	m	Номер групи	l	m
1	1	4	6	16	18
2	5	7	7	19	20
3	8	10	8	1	12
4	11	12	9	13	20
5	13	15	10	1	20

За результатами кількісної оцінки проектних рішень експериментального зразка визначають максимальні і мінімальні значення по всіх рівнях ієрархії, що дозволяє виявити причини зниження оцінок і прийняти відповідне управлінське рішення щодо покращення функцій, зовнішнього вигляду, удосконалення конструкції, кращого використання матеріалів тощо.

Так, оцінка першого сорту швейних виробів у п'ятибальній шкалі складає 3,5-5 балів, з інтервалом у 0,5 бала [9]. Тоді відносна розмірність першого сорту 0,7-1,0. Для визначення еталонних показників якості в розрахунках кількісної оцінки проектних рішень експериментального зразка рекомендується використовувати відносну розмірність 0,67-0,9, що відповідає показникам 100-бальної системи вище середнього – 0,67-0,8 і високому – 0,8-1,0 [10, 12].

Базові групові і одиничні показники якості експериментального зразка, які наведені в табл. 5, приймаються за еталонні для розрахунків показників якості конкретної проектної конструкторської документації.

Таблиця 5

Базові одиничні показники локальної системи оцінки якості експериментального зразка

Групові показники	Індекс	Одиничний показник	Еталонне значення	
			абсолютне	приведене
Призначення	1	Відповідність основному призначенню	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	2	Відповідність виробу розмірній і повнотно-віковій групі	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	3	Відповідність виробу сезону, сфері застосування та умовам експлуатації	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	4	Відповідність застосовуваних матеріалів, оздоблень і фурнітури призначенню виробу	3,5-5,0 б	0,7-1,0
Естетичні	5	Відповідність виробу сучасному напряму моди	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	6	Рівень оброблення і оздоблення виробу	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	7	Чіткість і виразність виконання товарних знаків і ярликів	3,5-5,0 б	0,7-1,0
Ергономічні	8	Статична відповідність	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	9	Динамічність	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	10	Зручність користування	3,5-5,0 б	0,7-1,0
Надійності	11	Можливості хімічного чищення, прання, прасування	3,5-5,0 б	0,7-1,0
	12	Міцність з'єднання деталей	3,5-5,0 б	0,7-1,0
Конструктивне наслідування	13	Ступінь повторюваності (уніфікації) складових частин	50-80%	0,5-0,8
	14	Ступінь повторюваності складових частин	60-80%	0,6-0,8
	15	Ступінь перспективного використання (новизни)	60-80%	0,6-0,8
Технологічна раціональність	16	Ступінь мінімізації числа деталей і з'єднань	70-80%	0,7-0,8
	17	Ступінь застосування паралельно-послідовних методів оброблення і складання	60-80%	0,6-0,8
	18	Ступінь механізації і автоматизації процесу	80%	0,8
Матеріаломісткість	19	Ступінь використання матеріалів	80-90%	0,8-0,9
	20	Критеріальний рівень економічності моделі	-	0,67-1,0

Висновки

Моніторинг якості продукції в цілому перш за все передбачає контроль можливих помилок поетапного проектування конструкторської документації.

Алгоритм застосування локальної системи оцінки якості скорочує час на коригування конструкторських документів шляхом використання еталонних базових показників якості.

Технічне регулювання локальної системи оцінки якості забезпечують системи конструкторської і технологічної документації, викладених у держстандартах України.

Література

1. Система показателей качества продукции. Изделия швейные бытового назначения. Номенклатура показателей : ГОСТ 4.45-86. – Госстандарт СССР, 1988. – 5 с.

2. Вироби швейні і трикотажні. Терміни та визначення : ДСТУ 2027-92: 1992. – К. : Держстандарт України. – 19 с.

3. Славінська А.Л. Практикум з проектування і конструктивного моделювання : в 2 ч. Ч. 1: Проектування та технічне моделювання базових конструкцій одягу : навч. посібник / А.Л. Славінська, О.П. Сиротенко. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – 267 с.

4. Славінська А.Л. Методи типового проектування одягу: навчальний посібник / А.Л. Славінська. – Хмельницький : ХНУ, 2012. – 179 с.

5. Славінська А.Л. Логістична координація інформаційних потоків серії моделей швейних виробів / А.Л. Славінська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 6. – С. 100–106.

6. Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять : ДСТУ 3321: 2003. – К. : Укрдержстандарт. – 52 с.

7. Славінська А.Л. Дизайн програма ідентифікації конструктивно-технологічних модулів в структурі технологічного процесу / А.Л. Славінська // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 5. – С. 134–141.

8. Савчук Н.Г. Квалітологія швейного виробництва : підручник / Н.Г. Савчук, С.М. Березненко, М.П. Березненко – 2-е вид. – К. : Арістей, 2007. – 464 с.

9. Коблякова Е.Б. Конструирование одежды с элементами САПР : учеб. для вузов / Е.Б. Коблякова, Г.С. Ивлева, В.Е. Романов и др. ; под ред. Е.Б. Кобляковой – 4-е изд. – М. : Легпромбытиздат, 1988. – 464 с.

10. Славінська А.Л. Основи модульного проектування одягу : монографія / А.Л. Славінська. – Хмельницький : ХНУ, 2008. – 159 с.

11. Система технологічної документації. Терміни та визначення основних понять : ДСТУ 2391 : 2010. – К. : Укрдержстандарт. – 31 с.

12. Славінська А.Л. Побудова лекал деталей одягу різного асортименту : навч. посібник / А.Л. Славінська. – Хмельницький : ХНУ, 2011. – 222 с.

References

1. Sistema pokazatelej kachestva produkcii. Izdelija shvejnye bytovogo naznachenija. Nomenklatura pokazatelej : GOST 4.45-86. – Gosstandart SSSR, 1988. – 5 s.

2. Virobi shvejni i trikotazhni. Termini ta viznachennja : DSTU 2027-92: 1992. – K. : Derzhstandart Ukraïni. – 19 s.

3. Slavins'ka A.L. Praktikum z proektuvannja i konstruktivnogo modeljuvannja : v 2 ch. Ch. 1: Proektuvannja ta tehnichne modeljuvannja bazovih konstrukcij odjagu : navch. posibnik / A.L. Slavins'ka, O.P. Sirotenko. – Hmel'nic'kij : HNU, 2016. – 267 s.

4. Slavins'ka A.L. Metodi tipovogo proektuvannja odjagu: navchal'nij posibnik / A.L. Slavins'ka. – Hmel'nic'kij : HNU, 2012. – 179 s.

5. Slavins'ka A.L. Logistichna koordinacija informacijnih potokiv serii modelej shvejnih virobiv / A.L. Slavins'ka // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2015. – № 6. – S. 100–106.

6. Sistema konstruktors'koï dokumentacïï. Termini ta viznachennja osnovnih ponjat' : DSTU 3321: 2003. – K. : Ukrderzhstandart. – 52 s.

7. Slavins'ka A.L. Dizajn programa identifikacïï konstruktivno-tehnologichnih moduliv v strukturi tehnologichnogo procesu / A.L. Slavins'ka // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2015. – № 5. – S. 134–141.

8. Savchuk N.G. Kvalitologija shvejnogo virobnictva : pidruchnik / N.G. Savchuk, S.M. Bereznenko, M.P. Bereznenko – 2-e vid. – K. : Aristej, 2007. – 464 s.

9. Kobljakova E.B. Konstruirovanie odezhdy s jelementami SAPR : ucheb. dlja vuzov / E.B. Kobljakova, G.S. Ivleva, V.E. Romanov i dr. ; pod red. E.B. Kobljakovoj – 4-e izd. – M. : Legprombytizdat, 1988. – 464 s.

10. Slavins'ka A.L. Osnovi modul'nogo proektuvannja odjagu : monografija / A.L. Slavins'ka. – Hmel'nic'kij : HNU, 2008. – 159 s.

11. Sistema tehnologichnoï dokumentacïï. Termini ta viznachennja osnovnih ponjat' : DSTU 2391 : 2010. – K. : Ukrderzhstandart. – 31 s.

12. Slavins'ka A.L. Pobudova lekal detalej odjagu riznogo asortimentu : navch. posibnik / A.L. Slavins'ka. – Hmel'nic'kij : HNU, 2011. – 222 s.

Рецензія/Peer review : 11.09.2017 р. Надрукована/Printed :26.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 687.016

О.М. ДОМБРОВСЬКА, В.В. МИЦА
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ БАЗОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ОДЯГУ ДЛЯ ХЛОПЧИКІВ ТА ДІВЧАТОК ДОШКІЛЬНОЇ ВІКОВОЇ ГРУПИ

В роботі наведено результати досліджень базових конструкцій одягу для дівчаток та хлопчиків дошкільної вікової групи, в результаті яких підтверджено антропометричну невідповідність величин змін розмірів конструктивних ділянок коефіцієнтам градації по лініях грудей і стегон зі зміною розміру (зросту) фігур для дитячого одягу.

Ключові слова: базова конструкція, дитячий одяг, конструктивна ділянка, градація лекал.

OKSANA MYKOLAYIVNA DOMBROVSKA, VIKTORIYA VASYLIVNA MYTSA
Khmelnytsky National University

RESEARCH OF BASIC CONSTRUCTIONS FOR CLOTHES AND DAILY PRIMARY AGE GROUP

The paper presents the results of studies of basic clothing designs for girls and boys of the preschool age group. As a result of the comparative analysis, slight deviations of some values of changes in the size of the structural sections from the gradation coefficients were revealed. These deviations are due to a significant independent variable of dimensional features of typical figures of boys and girls of the preschool age group. As a result of the research, the anthropometric inconsistency of the sizes of changes in the size of the constructive sections to the coefficients of gradation along the lines of the chest and thighs with the change in the size (growth) of figures for children's clothing has been confirmed. The discrepancy of gradation increments with the coefficients of gradation along the lines of the chest and thighs in the basic structures of shoulder products for boys and girls was found out, which makes it advisable to analyze the structure of the calculation formulas of the corresponding design methodology

Keywords: Basic design, children's clothes, constructive area, gradation of patterns.

Постановка проблеми

Сьогодні на значній кількості швейних підприємств, які займаються виготовленням одягу для дітей дошкільної вікової групи на етапі проектування виробів градацію лекал зазвичай виконують без врахування статі дитини. Таким чином, присутня на підприємствах практика проектування одягу для дітей дошкільної вікової групи без врахування статі дитини тягне за собою погіршення якості посадки виробів на фігурі і зниження рівня задоволення населення зручним одягом. Найчастіше ці проблеми пов’язані з габаритами виробу, які, в свою чергу, безпосередньо пов’язані з габаритами конструкції. Розрахункові формули методик конструювання встановлюють залежність розмірів конструкції від величин розмірних ознак. Крім того, габарити виробу формуються шляхом застосування в розрахункових формулах конструктивних прибавок.

Аналіз останніх джерел

Дослідження, проведені проф. Безкоровайною. Г. П. та проф. Куреновою. С. В. з метою удосконалення процесу проектування одягу, на стадії градації лекал, для дітей ясельної та дошкільної вікових груп показали, що значний вплив на розміри і форму ділянок статичного контакту одягу і, тим самим, на якість посадки виробів на фігурі має стать дитини.

Оскільки основною передумовою точності градації лекал є якісний процес проектування виробів то необхідно проаналізувати величини розмірних ознак фігур хлопчиків та дівчаток залежно від статі дитини, адже саме вони визначають розміри конструкції і, відповідно, габарити готового виробу.

Метою роботи є дослідження побудови базових конструкції одягу для хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи з метою їх удосконалення для подальшої градації одягу.

Виклад основного матеріалу

У відповідності до діючої системи стандартів типових фігур дітей та з врахуванням можливостей промисловості і умов торгівлі для проектування одягу для дітей дошкільної вікової групи передбачено оптимальне число типових фігур, яке включає в себе 8 типових фігур хлопчиків і 8 типових фігур дівчаток дошкільної вікової групи.

Для вирішення поставленої проблеми необхідно більш детально вивчити характер змінності розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи. Для цього пропонується розглянути розмірні ознаки усіх типових фігур дітей дошкільної вікової групи, які входять в розмірну типологію згідно з ГОСТ 17916-86 та ГОСТ 17917-86.

Враховуючи вище викладене було проведено порівняльний аналіз величин однойменних розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи та виявлена відмінність їх числових значень залежно від статі дитини (від 0 до 1,9 см).

У відповідності до цього здійснено порівняльний аналіз величин різниці розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток в залежності від зміни розміру та зросту. В таблиці 1 представлено різницю величини розмірних ознак типових фігур дівчаток та хлопчиків дошкільної вікової групи на базовий зріст зі зміною розміру фігури необхідних для побудови конструкції за методикою ЄМКО РЕВ [1, 2].

Як показують результати порівняльного аналізу, значну самостійну змінність однойменних розмірних ознак мають типові фігури дітей зі зміною розміру фігури. Аналогічно проведено порівняння величини розмірних ознак типових фігур дівчаток та хлопчиків на базовий розмір зі зміною зросту фігури.

Таблиця 1

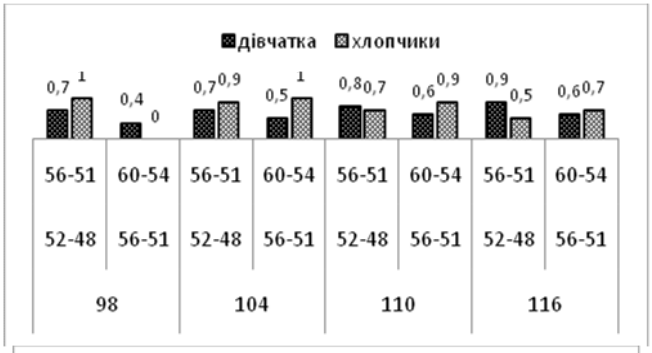
Різниця величини розмірних ознак типових фігур дівчаток та хлопчиків дошкільної вікової групи зі зміною розміру

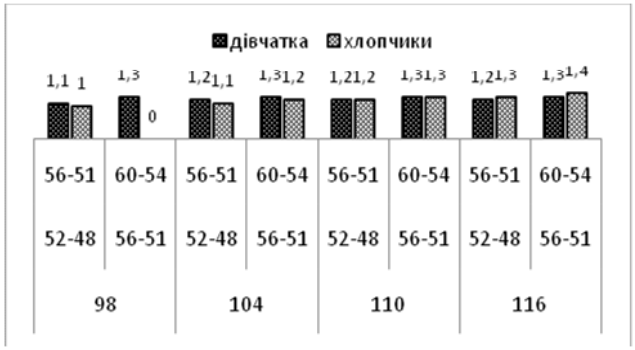
Найменування розмірної ознаки	Стать дитини	Позначення розмірної ознаки	Різниця величин розмірних ознак типових фігур дівчаток та хлопчиків зі зміною розміру (см)	
			110	
			52-48/ 56-51	56-51 /60-54
1	*2*	*3*	*4*	*5*
Висота точки основи шиї	дівчатка	Т4	0,3	0,1
	хлопчики		0,2	0
Висота лінії талії	дівчатка	Т7	0,2	0
	хлопчики		-0,1	0,1
Обхват шиї	дівчатка	Т13	0,8	0,6
	хлопчики		0,7	0,9
Обхват грудей перший	дівчатка	Т14	3,5	3,4
	хлопчики		3,8	3,1
Обхват грудей другий	дівчатка	Т15	3,6	3,4
	хлопчики		3,7	3,3
Обхват стегон з врахуванням виступу живота	дівчатка	Т19	3,1	3,1
	хлопчики		3	3
Обхват коліна	дівчатка	Т22	1,2	1,1
	хлопчики		1	1,1
Обхват зап’ястя	дівчатка	Т29	0,5	0,5
	хлопчики		0,6	0,5
Відстань від точки основи шиї збоку до променевої точки	дівчатка	Т32	0,7	0,3
	хлопчики		0,6	0,3
Відстань від точки основи шиї збоку до лінії обхвату зап’ястя	дівчатка	Т33	0,8	0,3
	хлопчики		0,5	0,5
Висота грудей	дівчатка	Т35	0,6	0,6
	хлопчики		0,6	0,7
Довжина талії спереду	дівчатка	Т36	0,6	0,4
	хлопчики		0,6	0,5
Дуга через вищу точку плечового суглоба	дівчатка	Т38	0,6	0,6
	хлопчики		0,8	0,5
Відстань від точки основи шиї ззаду до рівня заднього кута пахвової впадини	дівчатка	Т39	0,1	0,2
	хлопчики		0,3	0,3
Довжина спини до талії з врахуванням виступу лопаток	дівчатка	Т40	0,1	0
	хлопчики		0,7	0,2
Ширина грудей	дівчатка	Т45	1,2	1,3
	хлопчики		1,2	1,3
Відстань між сосковими точками	дівчатка	Т46	0,7	0,7
	хлопчики		1	0,7
Ширина спини	дівчатка	Т47	1,2	1
	хлопчики		1,4	0,9
Ширина пахвової впадини	дівчатка	Т109	0,5	0,5
	хлопчики		0,5	0,5

Результати порівняльного аналізу показали значну (близько 59%) самостійну змінність однойменних розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи зі зміною зросту фігури.

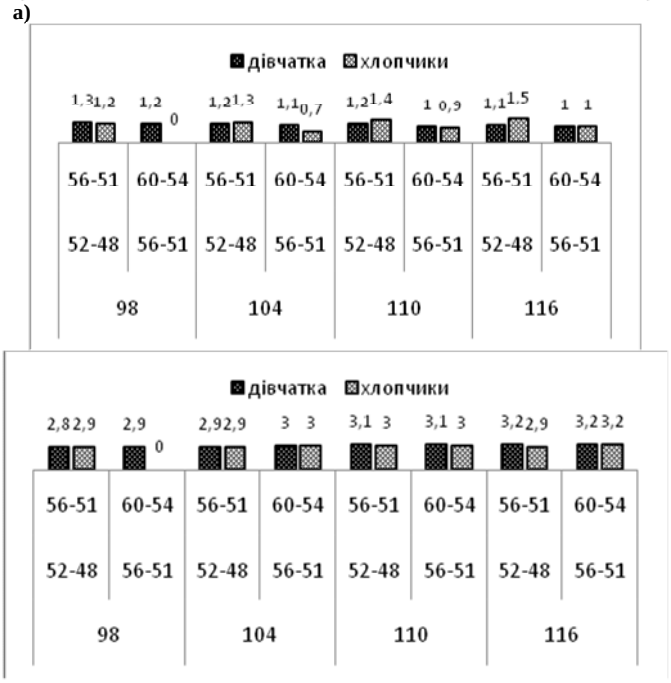
Оскільки проведений аналіз показав відмінність величин однойменних розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток, а також відмінність величин різниці цих розмірних ознак при зміні розміру (зросту) з врахуванням статі дитини, то в результаті проектування одягу для дітей дошкільної вікової групи відрізнятимуться і розміри конструкцій виробів, і, відповідно, габарити готових виробів залежно від статі дитини.

Характер змінності однойменних розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи, величини різниці деяких розмірних ознак зі зміною розміру фігури залежно від статі дитини зображено у вигляді діаграм (рис. 1).





а) б)



в) г)

Рис. 1. Різниця величин розмірних ознак типових фігур дівчаток та хлопчиків дошкільної вікової групи зі зміною розміру (см): а) обхват шиї (Т13); б) ширина грудей (Т45); в) ширина спини (Т47); г) обхват стегон з врахуванням виступу живота (Т19)

Оскільки величини приростів в конструктивних точках відіграють надзвичайно важливу роль в процесі градації лекал одягу, було проведено порівняльний аналіз величин змін розмірів конструктивних ділянок в лекалах виробів для хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи при збільшенні розміру (зросту) фігури, а також їх відповідність коефіцієнтам градації. Величини зміни розмірів конструктивних ділянок в деталях виробів при збільшенні розміру на прикладі фігур дівчаток для плечового одягу за методикою ЄМКО РЕВ наведені в таблиці 2.

В результаті проведеного порівняльного аналізу була підтверджена антропометрична невідповідність величин змін розмірів конструктивних ділянок коефіцієнтам градації по лініях грудей і стегон зі зміною розміру (зросту) фігури у плечових виробах як для хлопчиків, так і для дівчаток.

Для виявлення причин антропометричної невідповідності величин змін розмірів конструктивних ділянок по лініях грудей і стегон необхідно проаналізувати формули розрахунку ширини виробу по лінії грудей, оскільки саме ця ділянка базових конструкцій плечових виробів є найбільш відповідальною, адже визначає габаритні розміри плечових виробів по ширині.

Таблиця 2

Величини коефіцієнтів градації розмірних ознак та величини зміни розмірів конструктивних ділянок за розмірами (дівчатка) (см)

Назва конструктивної ділянки	98				104				110				116			
	52-48 56-51		56-51 60-54		52-48 56-51		56-51 60-54		52-48 56-51		56-51 60-54		52-48 56-51		56-51 60-54	
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*
Ширина спинки на рівні виміру ширини спини	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0
Ширина пройми виробу	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
Ширина переду на рівні виміру ширини грудей	1,0	1,1	1,6	1,3	1,2	1,2	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2	1,4	1,3
Ширина виробу по лінії грудей	3,2	4	3,4	4	3,2	4	3,4	4	3,4	4	3,2	4	3,4	4	3,6	4
Ширина виробу по лінії стегон	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	3	3	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,2
Глибина пройми	0,3	0,3	0,4	0,4	0,1	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0	0,1	0,1
Відстань від лінії талії до шийної точки	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0	0,2	0,2	0	0
Довжина переду до талії від вершини горловини переду	0,6	0,7	0,3	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,7	0,8	0,4	0,4	0,5	0,7	0,4	0,4
Відстань між виступаючими точками грудей	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7
Ширина рукава на рівні нижньої точки оката	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
Ширина рукава по низу	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4
Довжина рукава	0,3	0,3	0,1	0,1	0,5	0,5	0,1	0,1	0,6	0,6	0,3	0,3	0,8	0,8	0,5	0,5

В результаті проведеного аналізу виявлено незначні відхилення деяких величин змін розмірів конструктивних ділянок від коефіцієнтів градації. Ці відхилення зумовлені значною самостійною змінністю розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи. Зустрічаються поодинокі відхилення по ділянці ширини переду величиною 0,1 см зі зміною розміру фігури, по ділянці довжини переду до талії в межах від 0,1 до 0,2 см зі зміною розміру і зросту фігури, по ділянці ширини штанів на рівні лінії стегон величиною 0,1 см зі зміною розміру і зросту фігури, та по довжині штанів від талії до низу в межах від 0,2 до 0,3 см зі зміною зросту фігури.

Висновки

Таким чином, проведений порівняльний аналіз довів відмінність однойменних розмірних ознак типових фігур хлопчиків та дівчаток дошкільної вікової групи, а також їх значну самостійну змінність (близько 59%) зі збільшенням розміру (зросту) фігури залежно від статі дитини. Окрім цього виявлено невідповідність приростів градації коефіцієнтам градації по лініях грудей і стегон у базових конструкціях плечових виробів як для хлопчиків, так і для дівчаток, в результаті чого доцільно проаналізувати структуру розрахункових формул відповідної методики конструювання ЄМКО РЕВ.

Література

1. Единая методика конструирования одежды стран-членов СЭВ (ЕМКО СЭВ). Базовые конструкции одежды для девочек. Т. 5. – М. : ЦНИИТЭИлегпром, 1988. – 116 с.

2. Единая методика конструирования одежды стран-членов СЭВ (ЕМКО СЭВ). Базовые конструкции одежды для мальчиков. Т. 6. – М. : ЦНИИТЭИлегпром, 1988. – 116 с.

References

1. Edinaya metodika konstruirovaniya odejdyi stran-chlenov SEV (EMKO SEV). Bazovyie konstruktsii odejdyi dlya devochek. T. 5. – M. : TSNIITEIlegprom, 1988. – 116 s.

2. Edinaya metodika konstruirovaniya odejdyi stran-chlenov SEV (EMKO SEV). Bazovyie konstruktsii odejdyi dlya malchikov. T. 6. – M. : TSNIITEIlegprom, 1988. – 116 s.

Рецензія/Peer review : 09.09.2017 р. Надрукована/Printed :25.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 675.023

Л.В. ПЕЛИК, Ю.А. ПЕЛЕХ
Львівський торговельно-економічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПІДБОРУ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ОРГАНІВ ДИХАННЯ

Вивчено асортимент засобів індивідуального захисту органів дихання, представлений на ринку України. Доведено доцільність їх використання в умовах агресивних середовищ. Проаналізовано новітні розробки текстильних матеріалів для фільтрувальних систем.

Ключові слова: фільтрувальні матеріали, засоби захисту органів дихання.

L.V. PELYK, Y.A. PELEH
Lviv University of Trade and Economics

FEATURES OF SELECTION OF TEXTILE MATERIALS FOR RESPIRATORY PROTECTION

The assortment of means of personal protection of respiratory organs, presented in the Ukrainian market, was studied. The expediency of their use in aggressive environments has been proved. It has been established that the main role in the work of respirators is played by the filter material, from which they are completely or partially composed. Woven materials from natural, synthetic or mineral fibers serve as a filtering partition; nonwoven fibrous materials (felt, glued and needle-punched materials, paper, cardboard, fibrous mats); sponge rubber, polyurethane foam, membrane filters. Most often fiber is used for polyethylene, polypropylene, polyamide and polyester, and thermoplastics are also popular. Filtration polymer films are presented, which are uniform layers of ultrathin polymer fibers deposited on or without a substrate. This is traditional perchlorvinyl, acetylcellulose, polystyrene; materials with increased filtering properties include copolymer of styrene and acrylonitrile, with high thermal stability - polytyrfluosteristol, polysulfone; formaldehyde resins, polyacrylonitrile, are sometimes used. The latest developments of textile materials for filter systems are analyzed.

Keywords: filtering materials, respiratory protective equipment.

Вступ. Сучасний комплекс промислових підприємств використовує складне поєднання виробничих процесів. Разом з тим, умови праці в окремих галузях зберігають свої особливості, зумовлені їх специфікою і, подекуди, далекі від необхідних.

Одним із несприятливих факторів, які впливають на здоров'я працюючих на підприємствах індустрії, є пил. У робочих зонах багатьох цехів рівень запиленості перевищує ГДК (10 мг/м^3) і величину гранично допустимих викидів в атмосферу. Це призводить до погіршення якості повітря робочої зони та атмосфери поблизу підприємств, Отже, веде до зростання числа професійних захворювань, зниження продуктивності праці та підвищує рівень забруднення міського середовища.

Високодисперсне аерозольне забруднення становить особливу небезпеку, воно віднесене Всесвітньою Організацією Охорони Здоров'я до пріоритетних небезпечних і шкідливих виробничих факторів і безпосередньо пов'язане з технологічним та технічним переозброєнням, впровадження нанотехнологій.

На промислових підприємствах повітря робочої зони може забруднюватися шкідливими речовинами, які утворюються в результаті технологічного процесу. Ці речовини потрапляють у повітря у вигляді пилу, газів або пари і діють негативно на організм людини. Залежно від їх токсичності та концентрації в повітрі можуть бути причиною хронічних отруєнь або професійних захворювань. Це призводить до атрофічних, гіпертрофічних, гнійних, виразкових та інших змін слизових оболонок, бронхів, легень, шкіри; веде до катару верхніх дихальних шляхів, виразковому захворюванню носової перетинки, бронхіту, пневмонії, кон'юнктивіту, дерматиту та інших захворювань.

За даними Фонду соціального страхування від нещасних випадків та професійних захворювань України у структурі професійних захворювань перше місце належить хворобам органів дихання – 49,2 % від загальної кількості по Україні (868 випадків). Найбільше їх зафіксовано в галузі добувної промисловості і розробленні кар'єрів – 77,4% від загальної кількості по Україні (1365 осіб), що на 35,1% (738 осіб) менше у порівнянні з минулим роком.

Усі існуючі фільтрувальні текстильні матеріали не здатні забезпечити максимальне вловлювання шкідливих часточок при збереженні оптимальних фізико-механічних властивостей, необхідних для ефективної роботи засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Тому над проблемою вдосконалення зразків працювали багато вчених, зокрема Голінько В.І., Чеберячко С.І., Мичко А.А., Клим'юк М.М., Щербакова О.А., Філатов Ю.М., Супрун Н.П., Тюріков Б.М., Трубіцина М.Є., Марініна О.Н., Чорний К.А. та ін. Їх розробки стосуються багатьох сфер використання – від проблем запилення в агропромисловому комплексі до покращення умов роботи зварювальників та розробки газо-пилозахисних респіраторів полегшеного типу.

Постановка завдання. Метою статті було відобразити оновлення ринку фільтрувальних текстильних матеріалів, які використовуються у засобах для захисту органів дихання, за рахунок новітніх розробок.

Результати досліджень. Основними джерелами утворення дезінтеграційного пилу є такі процеси: 1 – механічне подрібнення твердих тіл (подрібнення, різання, розмелювання); 2 – обробка поверхні металу (шліфування, полірування, ворсування); 3 – транспортування, перемішування, пакування подрібнених

матеріалів. Окрім того, пили, утворюються при горінні палива та інших різних хімічних процесів [1].

У приміщеннях, де не можна створити нормальні умови, що відповідають нормам мікроклімату, застосовують засоби індивідуального захисту, до яких належать фільтрувальні пристрої та ізолювальні дихальні апарати. Фільтрувальні пристрої складаються з лицевої частини та фільтра. Лицева частина (респіратор), в залежності частини обличчя, що затуляється, може бути представлена маскою, півмаскою, чвертьмаскою, мундштучними пристроями, шоломами, капюшонами.

Згідно ДСТУ EN 133:2005 [2] фільтрувальні пристрої поділяються на: протиаерозольні ("Кама", ШБ-1, У-2К, РП-К, "Астра-2", Ф-62ІІІ. РПА), протигазові (РПГ-67А, РПГ-67В, РПГ-67КД, протигази марок А, В, КД, Г, Е, СО, М, БКФ) та комбіновані (РУ-60М, "Сніжок ГП").

Усі нормативні документи України, що віднесені до розділу «Засоби індивідуального захисту», гармонізовані з діючими у ЄС. На практиці найпоширенішим є наступне маркування фільтрувальних елементів (EN 149: 2001 + A1: 2009 «Respiratory protective devices – Filtering half masks to protect against particles – Requiremments, testing, marking»):

- *NR* – одноразове використання, R – багаторазове;
- *D* (optional Dolomite) – Доломіт-тест (засоби випробовують фільтрацією дрібних твердих частинок і аерозолів, позитивний результат у майбутньому забезпечує більш комфортне дихання);
- *SL* – маски захищають одночасно від пилу і аерозолів;
- *VO* – захист від органічних парів;
- *GA* – захист від парів кислот.

Респіратори можуть бути з клапаном для видиху або без нього. Вони мають три рівні фільтрації та здатні захистити від певних шкідливих речовин:

1. FFP1 (низький рівень фільтрації) **–** ефективні при *4-кратному перевищенні ГДК* у повітрі. Нейтралізують вплив карбонату кальцію, каоліну, цементу, целюлози, сірки, бавовни, борошна, вугільного та залізорудного пилу, харчових і мінеральних масел, деревної стружки

2. FFP2 (середній рівень фільтрації) **–** ефективні при *12-кратному перевищенні ГДК* в повітрі. Захищають від скляних осколків, пластику, кварцу, міді, алюмінію, органічних парів, фарб, пестицидів, бактерій, грибків, вірусів туберкульозу, сильних запахів.

3. FFP3 (високий рівень фільтрації) – ефективні при *50-кратному перевищенні ГДК* у повітрі. Бережуть від частинок хрому, нікелю, марганцю, платини, стрихніну, пилу і випаровування металів, мікробактерії туберкульозу, вірусів та ферментів.

Основну роль у роботі респіраторів відіграє фільтрувальний матеріал, з якого вони повністю чи частково складаються.

У якості фільтруючої перегородки виступають ткані матеріали з природних, синтетичних або мінеральних волокон; неткані волокнисті матеріали (повсть, клеєні і голкопробивні матеріали, папір, картон, волокнисті мати); губчаста гума, пінополіуретан, мембранні фільтри. Найчастіше використовують волокна поліетилену, поліпропілену, поліаміду та поліефіру, популярні також термопласти. Фільтрувальні полімерні полотна (ФПП) являють собою рівномірні шари ультратонких полімерних волокон, нанесених на підкладку чи без неї. Це традиційний перхлорвініл, ацетилцелюлоза, полістирол; до матеріалів з підвищеними фільтрувальними властивостями відноситься сополімер стиролу і акрилонітрилу, з високою термостійкістю – політрифторстирол, полісульфон; інколи використовуються формальдегідні смоли, поліакрилонітрил, деякі фторопласти. Їх особливістю є висока ефективність уловлювання найбільш проникаючих частинок при порівняно низькому опорі повітря. ФПП випускаються трьох основних типів: ФПП-40, ФПП-70 і ФПП-15, що розрізняються середнім діаметром волокон. У свою чергу, кожен тип матеріалу поділяється на кілька марок, відрізняються товщиною фільтруючого шару і, відповідно, ефективністю уловлювання аерозолів.

Основною проблемою при розробці ЗІЗОД є підбір матеріалу, здатного поглинати шкідливі пари і гази протягом заданого часу, не змінюючи при цьому своїх хімічних і механічних властивостей, та який має низький аеродинамічний опір. При цьому він не повинен мати подразнюючої чи токсичної дії на шкіру людини, бути стійким до механічних і хімічних впливів в умовах застосування.

Найбільш ефективним матеріалом для респіраторів вважався волокнистий фільтруючий матеріал ФП (фільтр Петрянова), отриманий методом електростатичного формування волокон з розчинів полімерів. Однак, його ефективність значно знижується при підвищеній вологості повітря. Додавання в фільтрувальний матеріал сорбенту – активованого вугілля, дозволяє поглинати леткі органічні сполуки, запахи, однак не віруси.

Поширеним є також матеріал, отриманий з волокон перхлорвінілу, який є хорошим ізолятором, завдяки чому тривалий час зберігаються електростатичні заряди, які сприяють уловлюванню аерозолів та забезпечують високі фільтрувальні властивості. Але постала проблема сировини, яка б задовольняла вимоги існуючих санітарних норм для респіраторного фільтрувального текстильного матеріалу.

Матеріал з поліакрилонітрильних волокон, наповнений активованим вугіллям, має високу сорбційну здатність і може використовуватися в респіраторах для захисту від шкідливих речовин, зокрема пестицидів, у концентраціях, що перевищують ГДК в 10 разів.

Із проаналізованих наукових праць [3, 4] випливає можливість електростатичного формування волокон з розчину полікарбонату в дихлорметані. Однак такі фільтрувальні матеріали володіють високими значеннями аеродинамічного опору і поверхневої густини. Зважаючи на виявлені недоліки у роботі

респіраторів із використанням охарактеризованих текстильних матеріалів, вченими був розроблений новий фільтр з покращеними фізико-механічними показниками, який задовольняє усі санітарні норми. Це матеріал із робочим шаром волокон діаметром 1–10 мкм, отриманий експериментальним методом електростатичного формування з розчину полікарбонату в суміші розчинників дихлоретану та хлористого метилену. Запропонований фільтрувальний матеріал нового покоління, який володіє добрими сорбційними властивостями, високою ефективністю очищення повітря від забруднень органічного та неорганічного походження і низьким аеродинамічним опором. Він складається з двох шарів нетканого текстильного матеріалу між якими утворений шар гідрату окису алюмінію. Висока ефективність фільтрації такого матеріалу визначається діаметром волокон і наявністю у них стійкого електричного заряду.

У результаті наукового і патентного пошуку було виділено перспективні напрямки розробки текстильних матеріалів для респіраторів: нанесення нових сорбентів на традиційний фільтр Петрянова; застосування матеріалу з пористих поліакрилонітрильних волокон, в об’єм яких вводиться порошкоподібний сорбент (вугілля, іонообмінні смоли, цеоліти); використання матеріалу з каталітичними властивостями (гопкаліт) для розкладання шкідливих газів.

Актуальним залишається вдосконалення респіраторів шляхом розробки текстильних матеріалів для фільтруючого елемента на основі іонообмінних волокнистих матеріалів з метою поліпшення захисних і гігієнічних властивостей. Цей фільтрувальний матеріал складається з пористого шару у вигляді нетканого голкопробивного іонообмінного матеріалу, що містить шар полікапроамідного волокна і шар з бавовноподібного високомодульного модифікованого віскозного волокна. Він володіє тривалим часом захисної дії, високою міцністю та достатньою гігроскопічністю.

Більшість вчених стверджує, що найоптимальніше використовувати пакет фільтрів, який складається з волокнистих матеріалів з різним гідродинамічним опором. Кожен з фільтрів можна розглядати як каскад, на якому осідають аерозольні частинки певного розмірного діапазону. Частинки діаметром більше 2 мкм осідають переважно на першому каскаді пакета. Вітчизняними вченими [5] запропоновано нову модель респіратора, яка відрізняється тим, що введено зовнішній шар із спанбонду щільністю 20–25 мг/м^2, фільтрувальні шари зі змінною щільністю (від 30 до 55 мг/м^2) та нижній з гідрофобного матеріалу для вловлювання вологи.

Сучасним дослідником Припачкіним Д. А. досліджено вплив фізико-хімічних характеристик аерозолів на особливості їх осадження з потоків на фільтрувальні перешкоди. Це дозволяє виконувати розрахунки гідротехнічних і фільтруючих характеристик упорядкованих структур для моделювання реальних фільтрів, що значно спрощує вибір необхідних матеріалів для конкретних умов застосування.

Вирішуючи проблему захисту органів дихання при різних умовах експлуатації запропоновано поліфункціональні двошарові текстильні матеріали, шари яких мають діаметрально протилежні властивості. Для виготовлення зразків у якості сировини з гідрофільними властивостями використовується пряжа (бавовна 34%, льон 33%, віскоза 33%), а з гідрофобними – поліпропіленова мультифіламентна комплексна нитка.

Застосовуючи два різних сорбуючих шари матеріалу можна створити, респіратори з ширшим спектром використання. Поєднання двох шарів одного і того ж фільтрувального текстильного матеріалу дозволяє збільшити час захисної дії респіратора однієї марки, розширивши умови його застосування. Використовуючи іонообмінний волокнистий матеріал поліам-фоліт можна створити респіратор для захисту як від кислих, так і основних газів і т.д.

Особливу увагу слід звернути на використання нанотехнологій при виробництві фільтрувальних текстильних матеріалів. Це надзвичайно перспективні розробки, які дозволяють отримувати фільтри з нановолокон, які можуть застосовуватися для тонкої очистки повітря і інших газових середовищ від дисперсних частинок, навіть при підвищених температурах до 350 °С. Такий термостійкий нановолокнистий матеріал складається із внутрішнього робочого шару, створеного за допомогою електроформування з волокон полідифеніленфталіду, та двох зовнішніх захисних з нетканого кварцового матеріалу Для здійснення заявленого способу можуть бути використані пристрої для електрокапілярних технологій електроформування або пристрої для технології електроформування з вільної поверхні Nanospider.

Українські вчені під керівництвом Мичко А. [7] розробили принципово нові підходи до контролю за моментом проникнення сліду, роси, краплі, паро-газової та об’ємно-рідкої фази леткої і нелеткої агресивної електропровідної суміші та підвищення точності визначення оцінки їх проникнення через товщу матеріалу різного асортименту. Проведений аналіз усіх способів, які використовуються для визначення проникності фільтрувальних матеріалів в основі ЗІЗОД засвідчив, що між ними є кілька відмінностей, але вони не враховують деструктивних процесів у фільтрувальному текстильному матеріалі, які відбуваються разом із процесами дифузії, тобто руйнування волокон чи полімерного покриття.

Висновки

Аналіз сучасних тенденцій розвитку промисловості визначив необхідність створення і впровадження нових ефективних технологій виробництва фільтрувальних текстильних матеріалів для захисту органів дихання. Вони мають бути здатними забезпечити максимальний рівень вловлювання шкідливих речовин, володіти високими показниками фізико-механічних властивостей для тривалої експлуатації засобів захисту, достатніми сорбційними властивостями та бути гігієнічними.

Основними напрямками вдосконалення фільтрувальних текстильних матеріалів слід вважати

розробку багатошарових систем, зокрема поєднання природних та хімічних волокон, нанесення на вже існуючі матеріали нових сорбентів та використання іонообмінних операцій у процесі фільтрування.

Література

1. Гандзюк М. П. Основи охорони праці : підручник [для студ. вищ. навч. закл.] / Є. П. Желібо, М. О. Халімовський. – 5-е вид. – К. : Каравела, 2011. – 384 с.

2. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація (EN 133:2001) : ДСТУ EN 133:2005 : 2006. – [Чинний від 2006-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – 11 с. – (Національні стандарти України).

3. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова / [Басманов П.И., Кириченко В.Н., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л.]. – М., 2002. – 193 с.

4. Пат. 2363519 Российская Федерация, МПК B01D39/16, A62B7/00. Фильтрующий материал для респираторов и респиратор / Филатов Ю. Н. ; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова. – № 2000131736/09 ; заявл. 2008115635/15 ; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 2.

5. Пат. 93674 Україна, МПК 2014.01, A62B23/00. Фильтрувальний респіратор / Голінько В. І. ; власник Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – № u201405005 ; заявл. 2014.01 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.

6. Защепкіна Н. Респіраторний захист людини за допомогою текстильних матеріалів / Н. Защепкіна, Н. Терентьєва // Наукові нотатки. – 2014. – Вип. 45. – С. 210–214. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2014_45_34.

7. Пат. 84774 Україна, МПК 2006, G01N15/08, G01N33/36, G01N33/44. Спосіб дослідження проникності матеріалів для засобів індивідуального захисту від агресивних речовин / Мичко А. А. ; власник Львівський державний університет безпеки життєдіяльності МНС України. – № a200610898 ; заявл. 2006.10 ; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.

References

1. Handziuk M. P. Osnovy okhorony pratsi : pidruchnyk [dlia stud. vyshch. navch. zakl.] / Ye. P. Zhelibo, M. O. Khalimovskyi. - 5-e vyd. - K. : Karavela, 2011. - 384 s.

2. Zasoby indyvidualnoho zakhystu orhaniv dykhannia. Klasyfikatsiia (EN 133:2001) : DSTU EN 133:2005 : 2006. – [Chynnyi vid 2006-07-01]. – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006. – 11 s. – (Natsionalni standarty Ukrainy).

3. Vyisokoeffektivnaya ochistka gazov ot aerozoley filtrami Petryanova / [Basmanov P.I., Kirichenko V.N., Filatov Yu.N., Yurov Yu.L.]. - M.: 2002. - 193 s.

4. Pat. 2363519 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B01D39/16 , A62B7/00. Filtruyuschiy material dlya respiratorov i respirator / Filatov Yu. N. ; zayavitel i patentoobladatel Nauchno-issledovatelskiy fiziko-himicheskiy institut im. L.Ya. Karpova. – # 2000131736/09 ; zayavl. 2008115635/15 ; opubl. 10.08.2009, Byul. # 2.

5. Pat. 93674 Ukraina, MPK 2014.01 , A62B23/00. Fyltruvalnyi respirator / Holinko V. I. ; vlasnyk Derzhavnyi vyshchyi navchalnyi zaklad «Natsionalnyi hirnychyi universytet». – № u201405005 ; zaiavl. 2014.01 ; opubl. 10.10.2014, Biul. № 19.

6. Zashchepkina N. Respiratornyi zakhyst liudyny za dopomohoiu tekstylnykh materialiv / N. Zashchepkina, N. Terentieva // Naukovi notatky. - 2014. - Vyp. 45. - s. 210-214. - Rezhym dostupu : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2014_45_34.

7. Pat. 84774 Ukraina, MPK 2006, G01N15/08, G01N33/36, G01N33/44. Sposib doslidzhennia pronyknosti materialiv dlia zasobiv indyvidualnoho zakhystu vid ahresyvnykh rechovyn / Mychko A. A. ; vlasnyk Lvivskyi derzhavnyi universytet bezpeky zhyttiediialnosti MNS Ukrainy. – № a200610898 ; zaiavl. 2006.10 ; opubl. 25.11.2008, Biul. № 22.

Рецензія/Peer review : 17.09.2017 р. Надрукована/Printed :24.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 675.046

О.В. КОНДРАТЮК, Е.Є. КАСЬЯН
Київський національний університет технологій та дизайну

ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ ШКІР

У статті наведено результати досліджень впливу модифікації акрилових і уретанових плівкоутворювачів на фізико-механічні властивості і стійкість до дії води отриманих полімерних плівок. Показано, що їх модифікація екзополіакриламідом і структуруючим агентом створює передумови для отримання ефективних плівкоутворювачів з необхідними технологічними характеристиками.

Ключові слова: акрилові й уретанові плівкоутворювачі, модифікація, екзополіакриламід, структуруючий агент.

O. KONDRATUIK , E. KASYAN
Kiev National University of Technologies and Design

PROPERTIES OF MODIFIED POLYMER COMPOSITIONS FOR LEATHER FINISHING

The article presents the results of investigations of the influence of the modification of acrylic and urethane film forming on the physical and mechanical properties and the water resistance of the obtained polymeric films. It is shown that their modification with exopolyacrylamide and a structuring agent creates the preconditions for obtaining effective film formers with the necessary technological characteristics.

Keywords: acrylic and urethane film formers, modification, exopolyacrylamide, structuring agent.

Вступ

Сучасне оздоблення шкіряного напівфабрикату передбачає створення комплексу властивостей покриття і готової шкіри, що мають задовольняти технологічним, експлуатаційним і естетичним вимогам та забезпечувати комфортність і тривале використання шкіряних виробів [1].

Покривне фарбування, що включає комплекс хімічних, фізико-хімічних та механічних впливів на шкіру, є основним процесом заключного оздоблення, здатним забезпечувати високі експлуатаційні, гігієнічні та естетичні показники покриття. Під експлуатаційними властивостями покриття мають на увазі адгезію, стійкість до механічних і атмосферних впливів (тертя і багаторазових вигинів, водо-, світло-, тепло- й морозостійкість) та тривале збереження цих показників у процесі експлуатації готових виробів. Необхідний рівень експлуатаційних характеристик покриття залежить від фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей самих покривних плівок. При розробці складу покривних композицій також необхідно враховувати покривність, еластичність і міцність покривної плівки, її волого- та водостійкість. Важливими також є гігієнічні властивості покриття, що забезпечують зручність і комфортність шкіряних виробів протягом усього терміну їх використання [2, 3].

Невід'ємною складовою покривних композицій є казеїн, присутність якого у складі покриття надає йому спорідненості до шкіри, сприяє кращому формуванню покривної плівки та поліпшенню її гігієнічних і естетичних властивостей. Однак, використання продукту білкового походження призводить до здорожчання процесу оздоблення, ускладнює зберігання покривних фарб і пігментних концентратів, що істотно скорочує термін їх придатності, погіршує умови формування покриття на шкірі та знижує якість готового покриття.

Тому, одним із шляхів підвищення якості і поліпшення експлуатаційних властивостей випущеної шкіряною промисловістю продукції є пошук і застосування для оздоблення шкіри нових ефективних матеріалів на заміну використовуваних, які б володіли комплексом властивостей, що дозволяють застосовувати їх з метою інтенсифікації процесу і поліпшення якості продукції. У цьому відношенні значний інтерес представляють матеріали і продукти, що характеризуються такими ж властивостями, що й казеїн, однак не мають притаманних йому недоліків.

Постановка завдання дослідження

Порівняльним аналізом результатів дослідження експлуатаційних властивостей покриттів на основі полімерів різної природи встановлено, що найперспективнішими композиціями є водні системи акрилових і поліуретанових плівкоутворювачів та їх сумішей при оптимальному співвідношенні компонентів [3]. Тому створення нових плівкоутворювачів, здатних покращити експлуатаційні властивості покриття, має відбуватися на основі акрилових та уретанових складових. Хімічна модифікація поліакрилатів і поліуретанів шляхом структурування, тобто введення в їх структуру певної кількості активних груп з утворенням нових зв'язків, дозволяє змінювати фізико-механічні властивості плівок, утворених з них [4].

Авторами проведено дослідження по використанню у складі покривних композицій препарату екзополіакриламіду (ЕПАА) [5], застосування якого сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик покривних плівок [6, 7]. Для підвищення водостійкості покриття до складу покривних композицій запропоновано додавати структуруючий агент основний сульфат хрому (ОСХ), що має забезпечити істотне зменшення набухання досліджуваних полімерних матеріалів у воді.

Враховуючи очікувану ефективність застосування для оздоблення шкір покривних композицій на основі модифікованих акрилових і уретанових полімерів *метою* даної роботи є дослідження впливу

природи плівкоутворювачів, препарату екзополіакриламіду та структуруючого агента ОСХ на властивості полімерних плівок, сформованих з використанням даних матеріалів та полімерних композицій на їх основі.

Об'єкти та методи дослідження

В дослідженнях для створення покривних композицій використано акрилові плівкоутворювачі Saracryl 588 і МБМ-3 та уретановий СЗПУ-7 АТЗ. Ці матеріали мають хороші плівкоутворювальні властивості та змішуваність з іншими компонентами покривних фарб. Модифікування плівкоутворювачів і покривних плівок проведено з використанням екзополіакриламіду ЕПАА [6] та основного сульфату хрому ОСХ. Основний сульфат хрому ОСХ (ОСТ 6-18-219-82) – порошок зеленого кольору, добре розчинний у воді. Вміст оксиду хрому (III) 25,6 %, основність – 42–46 %, сухий залишок 89,49 %.

Визначався індивідуальний вплив препаратів на плівкоутворювачі та їх комплексний вплив на сумішеві композиції акрилового й уретанового полімерів. Досліджувані полімерні плівки формували на тефлоновій підкладці за стандартною методикою [8]. Фізико-механічні дослідження одержаних плівок проводили на розривній машині РМУ-5 при швидкості нижнього затискача 50 мм/хв за методикою [8]. У якості показників досліджень полімерних плівок служили умовний модуль еластичності при 100-відсотковому видовженні і температурі 20 °С (σ_{100}), межа міцності при розтягуванні (σ_p), відносне видовження при розриві (ε_p). Набухання досліджуваних плівок у воді протягом 3 та 24 год визначали за методикою [8].

Результати та їх обговорення

Враховуючи зміну фізико-механічних властивостей полімерних плівок внаслідок їх модифікування препаратом ЕПАА [6] та очікувані зміни внаслідок структурування, для подальших досліджень обрано наступні плівкоутворювачі різної хімічної природи, здатні формувати полімерні плівки з невисоким модулем еластичності, середньою міцністю та значним видовженням: поліакрилати Saracryl і МБМ-3 та поліуретан СЗПУ-7 АТЗ.

Структурування плівкоутворювачів препаратом ОСХ спричиняє помітне зміцнення акрилових і уретанових полімерних плівок, тобто зростання їх модуля еластичності, межі міцності при розтягуванні та зменшення їх видовження при розриві (рис. 1, табл. 1). Причому ефект структурування особливо підсилюється при вмісті ЕПАА понад 5 % маси полімеру. Так, в присутності 3 % ОСХ від маси полімеру модуль еластичності поліакрилових плівок зростає майже у 2,4-2,5 рази, а поліуретанових – у 2,0-2,2 рази. Також, майже наполовину зростає міцність плівок, і зменшується їх видовження при розриві. Слід зазначити, що поліуретанові плівки мають більшу тягучість при однаковому впливі препарату ОСХ, що, звісно, пояснюється особливостями структурної будови полімерного ланцюга плівкоутворювача СЗПУ-7 АТЗ.

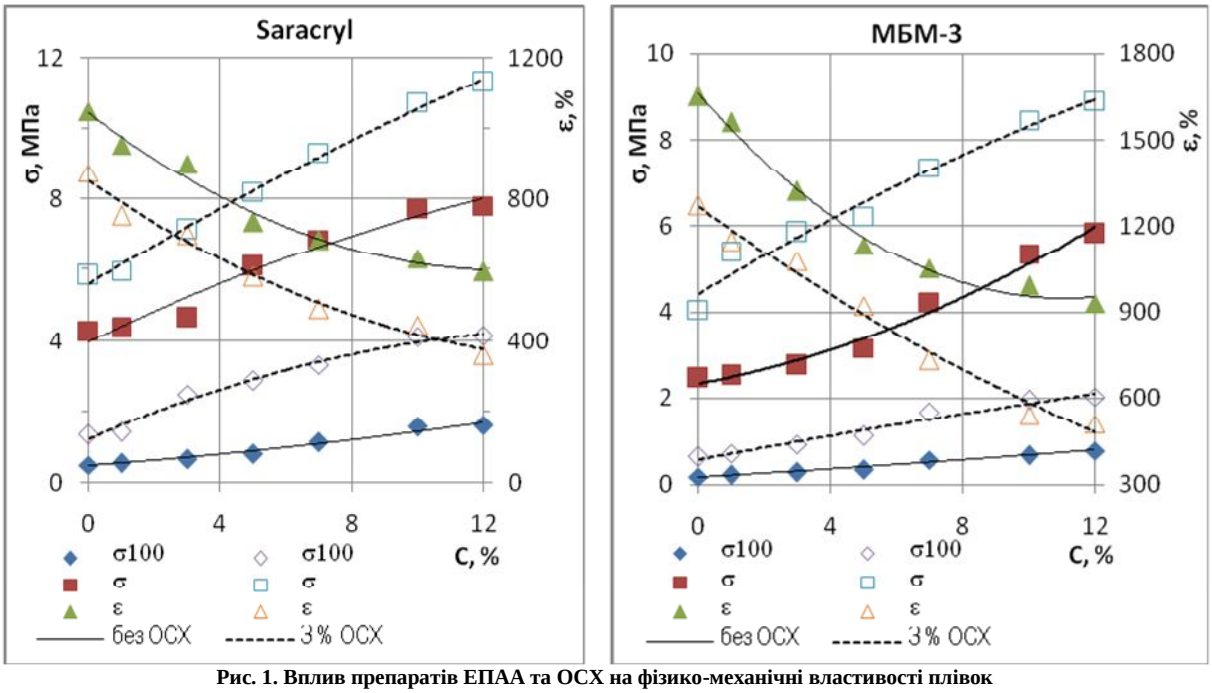


Рис. 1. Вплив препаратів ЕПАА та ОСХ на фізико-механічні властивості плівок

Додаткова модифікація композиційних полімерних плівок основним сульфатом хрому в кількості 1–3 % маси полімеру свідчить про підсилення ефекту структурування та подальше зміцнення плівок, що відображається на характері кривих фізико-механічних показників. Для композиційних плівок, отриманих з акрилових і уретанових полімерів, спостерігається схожа закономірність посилення ефекту структурування препаратом ОСХ (табл. 1, рис. 2).

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості модифікованих полімерних плівок

Плівко-утворювач	Показник	Вміст ОСХ, %	Вміст ЕПАА, %					
			0	1	3	5	7	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9
СЗПУ-7 АТЗ	σ_{100}, МПа	0	0,73	0,87	1,02	1,33	1,89	2,28
	σ_p, МПа	0	1,5	1,67	1,86	3,01	3,73	4,67
	ε_p, %	0	1070	1010	950	940	810	770
	σ_{100}, МПа	0,5	0,78	0,89	1,07	1,23	1,67	2,46
	σ_p, МПа	0,5	1,8	1,93	2,41	3,56	4,13	4,88
	ε_p, %	0,5	1020	985	920	815	735	680
	σ_{100}, МПа	1	0,95	1,07	1,65	1,97	2,33	2,8
	σ_p, МПа	1	2,17	2,27	2,74	3,96	4,77	5,35
	ε_p, %	1	980	950	875	780	725	640
	σ_{100}, МПа	3	1,55	1,72	2,48	2,87	3,32	4,11
	σ_p, МПа	3	2,72	3,17	3,85	4,25	6,15	7,86
	ε_p, %	3	880	855	780	700	600	550
Saracryl 588 + СЗПУ-7 АТЗ	σ_{100}, МПа	0	0,62	0,55	0,83	1,06	1,36	1,85
	σ_p, МПа	0	2,85	3,25	3,15	4,35	5,87	6,17
	ε_p, %	0	1055	1000	970	815	795	720
	σ_{100}, МПа	0,5	0,74	0,83	0,91	1,27	1,63	2
	σ_p, МПа	0,5	2,93	3,15	3,35	3,94	5,7	6,67
	ε_p, %	0,5	1010	990	940	840	770	665
	σ_{100}, МПа	1	0,87	1,07	1,63	2,11	2,35	2,34
	σ_p, МПа	1	3,12	3,19	3,55	4,13	5,79	6,94
	ε_p, %	1	980	960	910	835	745	615
	σ_{100}, МПа	3	1,15	1,42	2,03	2,43	2,76	3,11
	σ_p, МПа	3	3,64	3,72	3,87	4,26	6,23	7,83
	ε_p, %	3	870	860	820	790	720	590

Однак, з композиційних матеріалів вдається отримати більш тягучі полімерні плівки, видовження котрих у більшості задовольняє технологічні вимоги, навіть при 10 % вмісті ЕПАА та 3 % вмісті ОСХ. Особливо це спостерігається в полімерній композиції МБМ-3–СЗПУ-7 АТЗ (рис. 2), де відносне видовження при розриві залишається досить високим (понад 600 %). Тому цю полімерну композицію можна вважати такою, що найбільш відповідає технологічним вимогам до фізико-механічних показників покривних плівок.

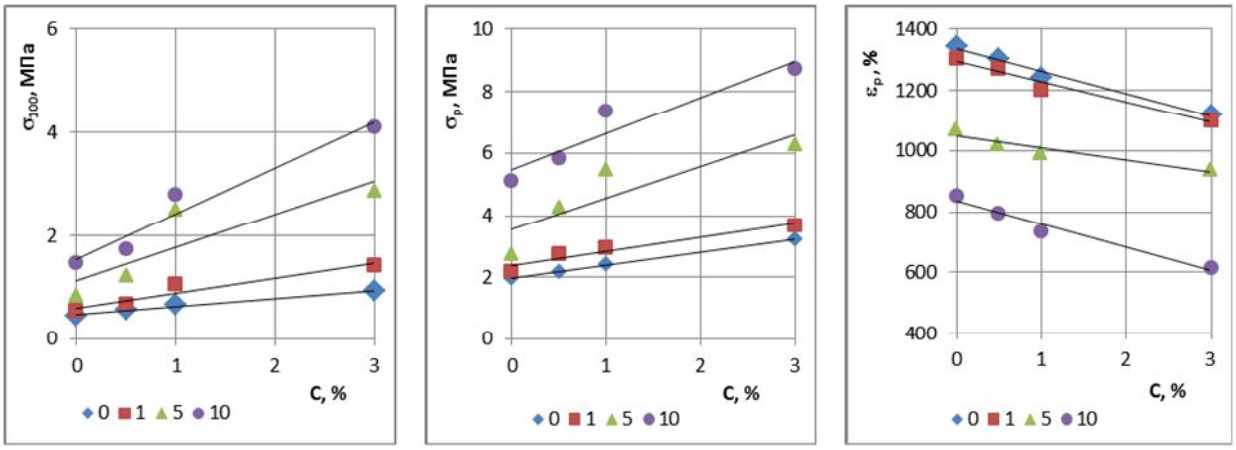


Рис. 2. Вплив вмісту ОСХ на фізико-механічні властивості модифікованих екзополіакриламідом композиційних плівок МБМ-3 – СЗПУ-7 АТЗ

Дослідження водостійкості індивідуальних та композиційних полімерних плівок показало, що гідрофільний препарат ЕПАА сприяє їх обводненню і зі збільшенням концентрації ЕПАА набухання плівок зростає [6]. Додаткова модифікація полімерних плівок препаратом ОСХ покращує їх водостійкість. Так, набухання плівок з полімерної композиції Saracryl + 7 % ЕПАА становить 184 % через 3 год і 332 % через 24 год. При додаванні в полімерну композицію препарату ОСХ в кількості 1,5 % маси полімеру набухання плівок зменшується майже в 4 рази (42 і 79 % через 3 і 24 год відповідно), ймовірно, внаслідок утворення додаткових фізико-хімічних зв’язків між плівкоутворювачем та продуктами ОСХ і ЕПАА.

Більш детальне дослідження впливу структурування на водостійкість модифікованих акрилових і уретанових полімерних плівок (табл. 2) засвідчило, що акриловий полімер МБМ-3 найбільш інтенсивно набухає при вмісті ЕПАА близько 5-7 %, далі інтенсивність обводнення дещо сповільнюється, а при вмісті ЕПАА понад 10 % показник набухання навіть дещо нижчий за попередній, ймовірно, внаслідок часткового вимивання надлишкової кількості препарату екзополіакриламіду з полімерних плівок.

Таблиця 2

Набухання модифікованих полімерних плівок

Плівкоутворювач	Вміст ОСХ, %	Вміст ЕПАА, %						
		0	1	3	5	7	10	12
МБМ-3	0	25,1	27,3	43,5	77,0	124,0	133,5	128,7
	0,5	22,2	24,0	35,4	61,3	112,5	121,0	117,7
	1	21,0	22,4	28,7	40,5	55,0	83,0	88,0
	2	19,5	21,4	20,4	25,0	33,0	53,5	73,3
	3	17,1	19,2	19,5	21,7	27,0	44,3	56,6
	5	18,9	17,2	15,2	17,4	23,5	33,3	42,1
СЗПУ-7 АТЗ	0	6,7	8,0	13,7	19,8	31,5	44,0	67,0
	0,5	7,0	8,5	13,6	20,3	33,5	47,7	72,2
	1	6,3	8,9	13,1	17,0	25,6	39,7	52,1
	2	6,6	8,6	11,9	15,4	18,5	27,7	37,2
	3	5,9	8,3	10,4	15,2	17,9	24,5	28,7
	5	5,2	8,1	9,6	14,5	15,4	21,7	24,3

Ступінь набухання у воді поліуретану СЗПУ-7 АТЗ значно менший, ніж поліакрилату МБМ-3, що пояснюється формуванням більш компактної структури полімеру в процесі отримання покривних плівок. Показники набухання модифікованого поліуретану у 2-3 рази нижчі, ніж модифікованого поліакрилату, навіть при вмісті 10–12 % ЕПАА. Додавання поліуретану до акрилового полімеру значно знижує обводнення сумішевої композиції. Показник набухання у воді композиційних плівок лише у 1,2-1,3 рази більше, ніж у модифікованого поліуретану, що також цілком ймовірно можна пояснити формуванням більш компактної структури композиційних полімерних плівок (рис. 3).

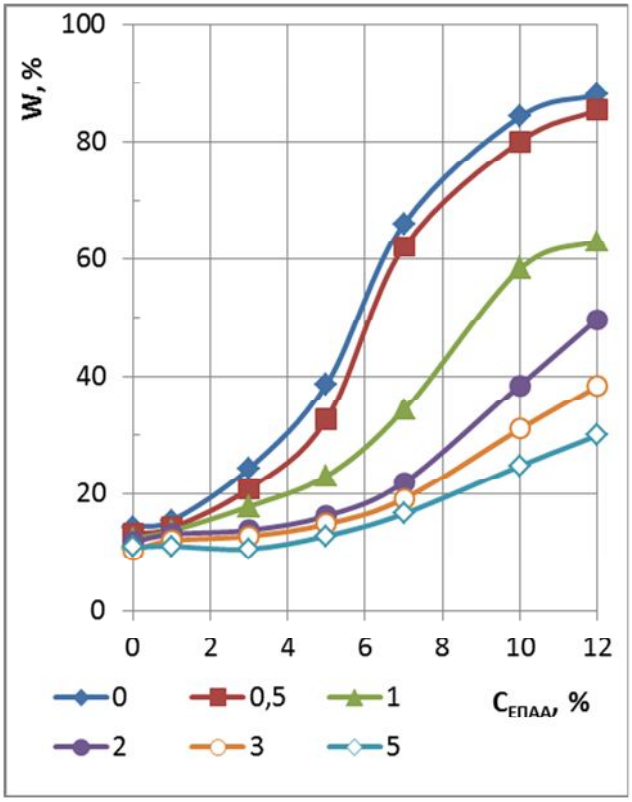


Рис. 3. Вплив вмісту ЕПАА та ОСХ на набухання композиційних полімерних плівок

Додаткове структурування полімерних плівок препаратом ОСХ сприяє зниженню їх набухання, причому для поліуретану цей ефект більш істотний, ніж для поліакрилату (табл. 2). Так, використання 2-3 % ОСХ створює умови для формування акрилових полімерних плівок з досить хорошою водостійкістю, а для поліуретанових – цілком достатньо 1-2 % ОСХ. Однак, слід зазначити, що на водостійкість полімерних плівок істотно впливає також присутній в композиції екзополіакриламід.

Водостійкість композиційних плівок, як і індивідуальних, також залежить від сумісного впливу вмісту екзополіакриламіду та основного сульфату хрому (рис. 3). Так, при незначному вмісті ОСХ (0,5-1,0 % маси полімеру) набухання плівок зростає при зростанні вмісту ЕПАА, особливо інтенсивно при 5-7 % препарату, а далі дещо сповільнюється внаслідок ймовірного вимивання надлишкового препарату ЕПАА, не зв'язаного з ОСХ і полімером. При вмісті в полімері до 5-7 % ЕПАА і 1-3 % ОСХ спостерігається незначне набухання плівок, що зростає ледь помітно, особливо при 2,5-3,0 % ОСХ. Подальше збільшення вмісту ЕПАА в плівці сприяє її обводненню, однак з меншою інтенсивністю, ніж у попередньому випадку.

Підвищення ступеня структурування полімерних плівок понад 3–5 % ОСХ не спричиняє істотного зниження їх водостійкості, оскільки, ймовірно, у цьому діапазоні концентрації ОСХ відбувається блокування більшості реакційноздатних груп полімеру і екзополіакриламіду. Також надмірне структурування полімеру спричиняє істотне підвищення жорсткості полімеру і не забезпечує отримання

полімерних плівок із необхідними фізико-механічними показниками (рис. 2). Тому, враховуючи фізико-механічні показники і водостійкість досліджених полімерних плівок, у покривних композиціях доцільно використовувати до 5–7 % ЕПАА та 2-3 % ОСХ від маси полімеру.

Висновки

1. Досліджено комплексний вплив препарату екзополіакриламіду та структуруючого агента основного сульфату хрому на фізико-механічні характеристики індивідуальних та композиційних полімерних плівок. Показано, що у всіх досліджуваних полімерних композиціях препарати ЕПАА і ОСХ зміцнюють модифіковані полімерні плівки, що полягає у помітному зростанні їх модуля еластичності, межі міцності при розтягуванні і зменшенні відносного видовження при розриві.

2. Розглянуто вплив препаратів ЕПАА і ОСХ на водостійкість індивідуальних та композиційних полімерних матеріалів. Показано, що ступінь набухання поліуретану СЗПУ-7 АТЗ значно менший, ніж поліакрилату МБМ-3, що пояснюється формуванням більш компактної структури полімеру в процесі отримання покривних плівок.

3. Визначено, що основний сульфат хрому сприяє зниженню набухання модифікованих екзополіакриламідом полімерних плівок і забезпечує їм необхідну водостійкість. Для ефективного формування покриття на шкірі слід застосовувати сумішеві акрилові й уретанові полімерні композиції з вмістом до 5–7 % ЕПАА та 2-3 % ОСХ від маси полімеру.

Література

1. Інноваційні технології виробництва шкіряних і хутрових матеріалів та виробів : монографія / А.Г. Данилкович, І.М. Грищенко, Е.Є. Касьян та ін. ; за ред. А.Г. Данилковича. – К. : Фенікс, 2012. – 344 с.

2. Касьян Е. Є. Технологія емульсійного оздоблення шкір композиціями з підвищеними адгезійними властивостями на основі модифікованих поліакрилатів / Е. Є. Касьян // Вісник КНУТД. – 2010. – № 5 (т. 3). – С. 67–72.

3. Данилкович А.Г. Акрилуретанові композиції у виробництві натуральної та синтетичної шкіри / А.Г. Данилкович, А.Г. Жигоцький, Е.Є. Касьян // Вісник КДУТД. – 2005. – № 1. – С. 60–66.

4. Касьян Е.Є. Шляхи посилення адгезійної взаємодії між покриттям і шкірою / Е.Є. Касьян // Вісник КНУТД. – 2012. – № 1. – С. 89–93.

5. Пат. 24856 Україна, МКИ$_4$ А С08F220/56. Спосіб одержання співполімеру поліакриламіду (ЕПАА) / Є.М. Видющенко, С.К. Воцелко, Р.І. Гвоздяк, В.П. Гнідець, О.О. Литвинчук, Г.С. Сарібеков, В.А. Болоховська. – Опубл.15.10.02, Бюл. № 10.

6. Кондратюк О.В. Властивості полімерних плівок, модифікованих похідними єкзополісахаридів / О.В. Кондратюк, Е.Є. Касьян // Вісник ХНУ. – 2016. – № 4. – С. 89–94.

7. Кондратюк О.В. Фізико-механічні властивості модифікованих полімерних матеріалів / О.В. Кондратюк, Е.Є. Касьян // Матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конф. "Сучасне матеріалознавство та товарознавство: теорія, практика, освіта" (м. Полтава, 22-23 березня 2016 р.). – Полтава : ПУЕТ, 2016. – С. 191–194.

8. Данилкович А.Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра / Данилкович А. Г. – К. : КДУТД, 1999. – 428 с.

References

1. Innovacijni tehnologiї virobnictva shkirjanih i hutrovih materialiv ta virobiv : monografija / A.G. Danilkovich, I.M. Grishhenko, E.Є. Kasʼjan ta in. ; za red. A.G. Danilkovicha. – K. : Feniks, 2012. – 344 s.

2. Kasʼjan E. Є. Tehnologija emulʼsijnogo ozdoblennja shkir kompozicijami z pidvishhenimi adgezijnimi vlastivostjami na osnovi modifikovanih poliakrilativ / E. Є. Kasʼjan // Visnik KNUTD. – 2010. – № 5 (t. 3). – S. 67–72.

3. Danilkovich A.G. Akriluretanovi kompozicії u virobnictvi naturalʼnoї ta sintetichnoї shkiri / A.G. Danilkovich, A.G. Zhigocʼkij, E.Є. Kasʼjan // Visnik KDUTD. 2005. № 1. S. 60–66.

4. Kasʼjan E.Є. Shljahi posilennja adgezijnoї vzaєmodiї mizh pokrittjam i shkiroju / E.Є. Kasʼjan // Visnik KNUTD. – 2012. – № 1. – S. 89–93.

5. Pat. 24856 Ukraïna, MKI4 A S08F220/56. Sposib oderzhannja spivpolimeru poliakrilamidu (EPAA) / E.M. Vidjushhenko, S.K. Vocelko, R.I. Gvozdjak, V.P. Gnidecʼ, O.O. Litvinchuk, G.S. Saribekov, V.A. Bolohovsʼka. – Opubl.15.10.02, Bjul. № 10.

6. Kondratjuk O.V. Vlastivosti polimernih plivok, modifikovanih pohidnimi єkzopolisaharidiv / O.V. Kondratjuk, E.Є. Kasʼjan // Visnik HNU. – 2016. – № 4. – S. 89–94.

7. Kondratjuk O.V. Fiziko-mehanichni vlastivosti modifikovanih polimernih materialiv / O.V. Kondratjuk, E.Є. Kasʼjan // Materiali II Mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї internet-konf. "Suchasne materialoznavstvo ta tovaroznavstvo: teorija, praktika, osvita" (m. Poltava, 22-23 bereznja 2016 r.). – Poltava : PUET, 2016. – S. 191–194.

8. Danilkovich A.G. Praktikum z himiї i tehnologiї shkiri ta hutra / Danilkovich A. G. – K. : KDUTD, 1999. – 428 s.

Рецензія/Peer review : 10.09.2017 р. Надрукована/Printed : 28.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК675.08:574.6

А.Ю. СЄРІКОВА, А.В. НІКОНОВА, О.А. АНДРЕЄВА
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ І ТОКСИЧНОСТІ РОЗЧИНІВ ДЛЯ ОБРОБКИ ШКІРЯНОГО НАПІВФАБРИКАТУ ПЕРЕД ДУБЛЕННЯМ

Досліджено показники фізико-хімічного складу та ступінь токсичності модельних розчинів, призначених для підготовки шкіряного напівфабрикату до дублення. У якості дослідних розчинів використано розчини полімерних матеріалів – похідних ненасичених карбонових кислот, контрольних – розчин сульфату амонію для солювання. Виявлено відмінності результатів якісного та кількісного аналізу розчинів полімерів порівняно з розчином сульфату амонію: відсутність сульфатів, зменшення показників вмісту азоту, ХСК та БСК$_5$. В ході оцінки токсичності аналізованих розчинів методом біотестування встановлено, що найменш токсичний вплив на водне середовище здійснюють розчини, одержані з використанням полімерів – похідних акрилової кислоти.

Ключові слова: шкіряне виробництво, модельні розчини,полімерні матеріали, склад, біотестування.

A.Y. SIERIKOVA, A.V. NIKONOVA, O.A. ANDREYEVA
Kyiv National University of Technologies and Design

INVESTIGATION OF THE COMPOSITION AND TOXICITY OF SOLUTIONS FOR PROCESSING OF SEMI-FINISHED LEATHER BEFORE TANNING

The indices of physical and chemical composition and toxicity of model solutions intended for preparation of semi-finished leather before tanning are investigated. As experimental solutions the solutions of polymeric materials which are derivative unsaturated carboxylic acids have been used, and as control the solution of ammonium sulphate has been used for salinity treatment. The differences of the qualitative and quantitative analyses of polymeric solutions in comparison with the solution of ammonium sulphate were established: no presence of sulphates, the decrease indices of nitrogen content, COD and BOD$_5$. In assessing the toxicity of solutions by bio-testing, it was found that the least toxic influence on the water environment in the case of using solutions of polymeric materials derivatives of acrylic acid.

Keywords: leather production, model solutions, polymeric materials, composition, bio-testing.

Вступ

Характерною особливістю вітчизняного шкіряного виробництва є нераціональне споживання водних ресурсів і чималі обсяги утворюваних технологічних стоків внаслідок використання застарілих, малоефективних хімічних реагентів та прийомів обробки. Оскільки значна частина матеріалів відпрацьовується недостатньо, має місце утворення концентрованих рідких відходів. При цьому найбільш отруйними та небезпечними забруднювачами стоків є різноманітні протеїн- та жировмісні речовини, сполуки хрому, феноли, ПАР, барвники, сульфіди, сульфати, хлориди, луги, кислоти і т.і. Неконтрольоване надходження цих речовин до загальних стоків є джерелом забруднення всієї системи водного середовища, значної втрати природних ресурсів, погіршення здоров’я населення [1, 2].

Сьогодні Україна з кожним кроком інтегрується в систему Європейського союзу, де законодавчі норми захисту навколишнього середовища є одними з найжорсткіших у світі. Виконання вимог ресурсозбереження промисловими підприємствами є обов’язковим для країн-членів Євросоюзу не лише в ракурсі мінімізації кількості стічних вод та викидів в атмосферу, а й переробки та абсолютної утилізації відходів виробництва. Забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної шкіри на західноєвропейських ринках неможливе без відповідності високим стандартам якості виробництва при одночасному збереженні навколишнього середовища [3]. У зв’язку з цим актуальним залишається оновлення та впровадження сучасних маловідходних технологій виробництва шкіри, зокрема безсольових та біотехнологічних способів обробки, переробки органічних відходів і побічних продуктів на нові види матеріалів, добрива або альтернативні джерела енергії [4–6].

Постановка завдання

Перспективним напрямом екологізації шкіряного виробництва є розробка та впровадження технологій з використанням сучасних нетоксичних хімічних матеріалів, наприклад, полімерних [7]. За участю авторів розроблено ресурсоощадні технології виробництва одягової шкіри з овчини шляхом заміни традиційного пікелювання перед дубленням сполуками хрому і титану на обробку полімерними матеріалами – похідними малеїнової та акрилової кислот, які забезпечують прискорення технологічного циклу, підвищують якість готової шкіри з більш раціональним використанням матеріальних витрат. При цьому у стічних водах зменшується вміст дубильних сполук, сульфатів і хлоридів, покращуються показники хімічного та біологічного споживання кисню, що, у свою чергу, послаблює біотоксичний вплив відпрацьованих дубильних розчинів на водне середовище [8, 9].

Разом з тим, розроблені технології передбачають надходження відпрацьованих розчинів полімерів до загальних стоків. Тому метою даної роботи було визначення якісних та кількісних показників розчинів, одержаних з використанням полімерів – похідних малеїнової та акрилової кислот, для обробки шкіряного напівфабрикату перед дубленням. З урахуванням відносної простоти, високої чутливості і можливості отримати інформацію, яку не можуть надати традиційні методи фізико-хімічного аналізу, для контролю токсичності аналізованих розчинів засновано метод біотестування, який ґрунтується на оцінці мінімальної дії фактору впливу середовища на життєдіяльність окремих видів живих організмів (біотів) або структурно-

функціональну організацію систему цілому [10, 11].

Об'єкти та методи дослідження

За об'єкт дослідження обрано вплив розчинів полімерних матеріалів на водне середовище;предмет – модельні розчини для обробки шкіряного напівфабрикату перед дубленням.

У дослідженні застосовано розчини полімерних матеріалів – похідних малеїнової (продукт Kro) та акрилової (продукти ТР та СР) кислоти концентрацією 10 г/дм^3 (у перерахунку на сухий залишок полімеру).У якості контрольного застосували розчин сульфату амонію концентрацією 30 г/дм^3. Концентрацію розчинів обрано з урахуванням витратиматеріалів для технологічних обробок [8, 12].

Під час визначення основних якісних та кількісних показників аналізованих розчинів використали традиційні та сучасні фізико-хімічні методи аналізу [13].

Для оцінки токсичності застосували тест-об'єкт у вигляді гіллясто-вусих ракоподібних *DaphniamagnaStraus*. Вибір виду біота обумовлений його поширеністю у прісноводних водоймах та високою чутливістю навіть при незначній концентрації токсичних речовин. Біотестування проводили влітку поточного року у лабораторних умовах. Для культивування тест-об'єкту, контролю та розведення проб використали відстояну протягом 10 діб водопровідну воду (жорсткість 11,0±0,5 мг екв/см^3, pH 7,5±0,1, температура 20±2 °С, вміст кисню не менше 6,0 мг O_2/см^3).

У кожну з дослідних та контрольних тест-камер з вмістом 100 мл досліджуваної проби вводили 10 тест-об'єктів віком до 24 год. Тестували проби вихідних тарозведених розчинів при кратності (*K*) 10, 500,1000, 10000. Облік кількості живих дафній здійснювали візуально через 1, 6, 24, 48, 96 год від початку досліду. На підставі отриманих даних визначили середньоарифметичний відсоток виживання тест-об'єктів у трьох дослідах. Критерієм гострої токсичності була загибель більше 50 %дафній у досліді порівняно з водою при експозиції протягом 96 год [14].

Гостру летальну концентрацію $ЛК_{50}$ визначали графічним методом [14]. Для цього на вісі абсцис відкладали десяткові логарифми концентрації(С, *log*10*)*, а на вісі ординат – відсотки виживаності тест-об'єктів у пробітах (‰). Через отримані точки проводили пряму. Потім з точки на вісі ординат, яка відповідає п'яти пробітам (50%), проводили лінію, паралельну вісі абсцис, до перетину з лінією графіка. З точки перетину опускали перпендикуляр на вісь абсцис. Точка перетину перпендикуляра вісі абсцис, відповідала десятковому логарифму $ЛК_{50}$, за величиною якого знаходили мінімальну кратність розведення та гостру летальну токсичністьу мг/дм^3.

Результати дослідження та їх обговорення

Порівняння якісних та кількісних показників досліджуваних розчинів дозволяє зробити висновок про те (табл. 1), що порівняно з розчином сульфату амонію розчини полімерів значно зменшують забруднення стічних вод. Для розчинів полімерів притаманним є відсутність сульфатів, зменшення показників вмісту азоту на 83,6–92,4, сухого залишку – на 27,6–52,8 (за винятком продукту СР), хімічного споживання кисню (ХСК) – на 35,3–53,1, біологічного споживання кисню ($БСК_5$) – на 23,5–48,8 %.

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних розчинів

Показник	Розчини з використанням			
	Kro	ТР	СР	$(NH_4)_2SO_4$
Колір	блідо-жовтий	блідо-жовтий	безбарвний	безбарвний
Прозорість, %	99	98	94	100
Значення pH	7,5	5,8	6,0	5,6
Вміст, мг/дм^3: - сухий залишок	21650	14100	31420	29900
- сульфати	-	-	-	30120
- загальний азот	1035	630	560	6320
ХСК, мг O_2/дм^3	207	150	188	320
$БСК_5$ (20 °С), мг O_2/дм^3	188	126	170	246
ХСК/БСК	1,1	1,2	1,1	1,3

Таблиця 2

Оцінка токсичності дослідних розчинів за показником виживання DaphniamagnaStraus

Кратність розве-дення *K*	Середньоарифметичний % виживання під час експозиції (год) з використанням														
	Kro					ТР					СР				
	1	6	24	48	96	1	6	24	48	96	1	6	24	48	96
0	0	0	0	0	0	73	33	0	0	0	80	70	40	0	0
10	67	37	3	0	0	100	73	61	49	33	100	73	61	53	30
500	100	93	78	56	43	100	90	75	72	57	100	96	75	70	66
1000	100	97	83	78	61	100	90	89	84	72	100	90	89	84	73
10000	100	100	94	89	87	100	96	94	88	81	100	96	93	90	85
Вода	100	100	100	93	87	100	100	100	93	87	100	100	100	93	87

З даних табл. 2 випливає, що вихідний розчин продукту Kro викликає повну загибель тест-об'єктів, а розчини продуктів ТР та СР зумовлюють загибель біотів менше ніж за 24 та 48 год відповідно. Стан тест-об'єктів погіршується у розчинах полімерів навіть при кратності розведення *К*=10000, при цьому відхилення показника виживання від контролю знаходиться в межах 2,0–11,1 %.

У пробі вихідного розчину сульфату амонію (табл. 3) також відбувається повна загибель тест-об'єктів, а при розведенні до *К*=10000 відхилення від контролю наприкінці тестування за показником виживання становить 33,3 %

Таблиця 3

Оцінка токсичності сульфату амонію за показником виживання DaphniamagnaStraus

Час, год.	Середньоарифметичний % виживання					
	К=0	*К*=10	*К*=500	*К*=1000	*К*=10000	Вода
1	0	17	83	100	97	100
6	0	0	57	80	90	100
24	0	0	0	47	80	100
48	0	0	0	14	78	93
96	0	0	0	5	58	87

В результаті визначення гострої летальної токсичності$ЛК_{50}$ (рис.) встановлено мінімальну кратність розведення, що відповідає допустимій кількості надходження речовин до загальних стоків: у разі використання продукту Kro – понад 1500 разів що відповідає концентрація 6,3 мг/дм^3; розчинів продукту ТР – понад 660 та продукту СР – 400, що відповідає концентрації 15,8 та 25,1 мг/дм^3 відповідно. Для розчинів сульфату амонію мінімальна кратність розведення повинна бути не менше 10000 (концентрація 3,0 мг/дм^3).

Під час порівняння токсичності розчинів полімерів встановлено, що найменш токсичний вплив на водне середовище мають розчини, одержані з використанням похідних акрилової кислоти. Одержані дані корелюють з результатами дослідження відпрацьованих розчинів після обробки шкіряного напівфабрикату продуктом СР порівняно з пікелюванням, в результаті чого встановлено суттєве зменшення негативного впливу шкіряного виробництва на природне середовище [15].

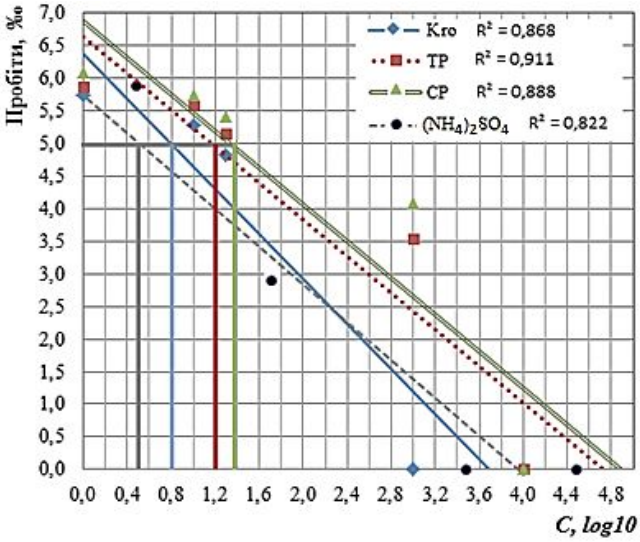


Рис. 1. Визначення гострої летальної токсичності графічним методом

Висновки

Для оцінки складу і токсичності розчинів полімерних матеріалів – похідних малеїнової та акрилової кислот, що застосовуються для обробки шкіряного напівфабрикату перед дубленням, проведено їх фізико-хімічний аналіз та біотестування. Встановлено покращення якісних та кількісних показників модельних розчинів полімерів порівняно з розчином сульфату амонію, який традиційно використовується для солювання: відсутність сульфатів, зменшення вмісту азоту на 83,6-92,4, сухого залишку – на 27,6–52,8, ХСК – на 35,3–53,1, $БСК_5$ – на 23,5–48,8 %.

На підставі біотестування аналізованих розчинів виявлено, щонайменш токсичний вплив на водне середовище чинять розчини, одержані з використанням полімерів – похідних акрилової кислоти.

З урахуванням викладеного одержані результати є додатковим підтвердженням екологічної перспективи використання ресурсоощадних технологій виробництва одягових овечих шкір мінерал-полімерного дублення.

Література

1. Саблій Л.А. Нова ефективна та маловідходна технологія біологічного очищення стічних вод шкіряних заводів / Л.А. Саблій, О.М. Бунчак, П.І. Гвоздик // Вісник КНУТД. – 2010. – № 6 (56). – С. 77–80.

2. Адакіна Н.І. Сучасні тенденції розвитку шкіряного виробництва / Н.І. Адакіна, А.Ю. Сєрікова, А.В. Пономаренко // Тези доповідей XVI Всеукра. наук. конф. молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», 27-28 квітня 2017 р. Т. ІІ. – К. : КНУТД, 2017. – С. 430–431.

3. Легка промисловість України: реалії та перспективи розвитку : експертно-аналітична доповідь / під ред. І.М. Грищенка. – К. : КНУТД, 2015. – 82 с.

4. Екологічно безпечні матеріали для шкіряного виробництва / О.Р. Мокроусова, О.В. Ковтуненко,

Е.Є. Касьян // Екологічна безпека. – 2012. – № 2 (14). – С. 93–98.

5. Salinity reduction in tannery effluent / C.A. Money, N.K.C. Babu // Leather international. – 2006. – № 208 (4762). – P. 30–32.

6. Голуб Н.Б. Біотехнології переробки органічних відходів шкіряного виробництва / Н.Б. Голуб, М.М. Шинкарчук, В.І. Ліщук // Збірник тез II Міжнародного науково-практ. семінару «Інноваційні матеріали та технології шкіряно-хутрового виробництва», 19 листопада 2016 р., Київ. – К. : КНУТД, 2016. – С. 73–76.

7. Сєрікова А.Ю. Хромощадні способи дублення шкір / А.Ю. Сєрікова, О.А. Андреєва // Збірник тез II Міжнародного науково-практ. семінару «Інноваційні матеріали та технології шкіряно-хутрового виробництва», 19 листопада 2016 р., Київ. – К. : КНУТД, 2016. – С. 32–33.

8. Nikonova A., Andreyeva O., Maistrenko L. Investigation of the properties of polymer-titanium tanned leather / Proceedings of the 6th International ConferenceICAMS2016, Advanced Materials and Systems Bucharest, Romania, October 20th – 22nd, 2016. – Bucharest, 2016. – P. 135–140.

9. Ніконова А.В. Порівняльна екологічна оцінка технологій хромового і титанового дублення / А.В. Ніконова, О.А. Андреєва, Л.А. Саблій // Вісник ХНУ. – 2017. – № 2 (247). – С. 67–71.

10. Критерії оцінки чутливості організмів та ефективності методик біотестування для визначення токсичних властивостей води / О.М. Крайнюков // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. – 2013. – № 8 (1054). – С. 80–85.

11. Вплив хімічних речовин токсичної дії на представників біотичної складової водних екосистем [Електронний ресурс] / О.М. Крайнюков, В.Д. Тімченко // Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки. – 2016. – № 38. – С. 111–120. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ponp_2016_38_13

12. Технологія шкіри та хутра : [підручник] / В.А. Журавський, Е.Є. Касьян, А.Г. Данилкович. – К. : ДАЛПУ, 1996. – 744 с.

13. Справочник кожевника (Отделка. Контроль производства) / под ред. Н.А. Балберовой. – М. : Легпромбытиздат, 1987. – 256 с.

14. ДСТУ 4173.2003. Визначення гострої летальної токсичності на Daphnia Magna Straus та Ceriodaphnia Affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea). – К., 2004. – 10 с.

15. Ніконова А.В. Застосування методу біотестування для визначення токсичності відпрацьованих розчинів шкіряного виробництва / А.В. Ніконова, О.А. Андреєва, Л.А. Майстренко // Матеріали IV Міжнародної науково-практ. конф. «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти», 26–28 жовтня 2016 р., Київ. – К. : Нац. техн. ун-т України «КПІ ім. І. Сікорського», 2016. – С. 141–143.

References

1. Sablii L.A. Nova efektyvna ta malovidkhodna tekhnolohiia biolohichnoho ochyshchennia stichnykh vod shkirianykh zavodiv / L.A. Sablii, O.M. Bunchak, P.I. Hvozdyk // Visnyk KNUTD. – 2010. – # 6 (56). – S. 77–80.

2. Adakina N.I. Suchasni tendentsii rozvytku shkirianoho vyrobnytstva / N.I. Adakina, A.Yu. Sierikova, A.V. Ponomarenko // Tezy dopovidei KhVI Vseukra. nauk. konf. molodykh uchenykh ta studentiv «Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi», 27-28 kvitnia 2017 r. T. II. – K. : KNUTD, 2017. – S. 430–431.

3. Lehka promyslovist Ukrainy: realii ta perspektyvy rozvytku : ekspertno-analitychna dopovid / pid red. I.M. Hryshchenka. – K. : KNUTD, 2015. – 82 s.

4. Ekolohichno bezpechni materialy dlia shkirianoho vyrobnytstva / O.R. Mokrousova, O.V. Kovtunenko, E.Ye. Kasian // Ekolohichna bezpeka. – 2012. – # 2 (14). – S. 93–98.

5. Salinity reduction in tannery effluent / C.A. Money, N.K.C. Babu // Leather international. – 2006. – # 208 (4762). – R. 30–32.

6. Holub N.B. Biotekhnolohii pererobky orhanichnykh vidkhodiv shkirianoho vyrobnytstva / N.B. Holub, M.M. Shynkarchuk, V.I. Lishchuk // Zbirnyk tez II Mizhnarodnoho naukovo-prakt. seminaru «Innovatsiini materialy ta tekhnolohii shkiriano-khutrovoho vyrobnytstva», 19 lystopada 2016 r., Kyiv. – K. : KNUTD, 2016. – S. 73–76.

7. Sierikova A.Yu. Khromoshchadni sposoby dublennia shkir / A.Yu. Sierikova, O.A. Andreieva // Zbirnyk tez II Mizhnarodnoho naukovo-prakt. seminaru «Innovatsiini materialy ta tekhnolohii shkiriano-khutrovoho vyrobnytstva», 19 lystopada 2016 r., Kyiv. – K. : KNUTD, 2016. – S. 32–33.

8. Nikonova A., Andreyeva O., Maistrenko L. Investigation of the properties of polymer-titanium tanned leather / Proceedings of the 6th International ConferenceICAMS2016, Advanced Materials and Systems Bucharest, Romania, October 20th – 22nd, 2016. – Bucharest, 2016. – R. 135¬–140.

9. Nikonova A.V. Porivnialna ekolohichna otsinka tekhnolohii khromovoho i tytanovoho dublennia / A.V. Nikonova, O.A. Andreieva, L.A. Sablii // Visnyk KhNU. – 2017. – # 2 (247). – S. 67–71.

10. Kryterii otsinky chutlyvosti orhanizmiv ta efektyvnosti metodyk biotestuvannia dlia vyznachennia toksychnykh vlastyvostei vody / O.M. Krainiukov // Visnyk KhNU im. V.N. Karazina. – 2013. – # 8 (1054). – S. 80–85.

11. Vplyv khimichnykh rechovyn toksychnoi dii na predstavnykiv biotychnoi skladovoi vodnykh ekosystem [Elektronnyi resurs] / O.M. Krainiukov, V.D. Timchenko // Problemy okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha ta ekolohichnoi bezpeky. – 2016. – # 38. – S. 111–120. – Rezhym dostupu : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ponp_2016_38_13

12. Tekhnolohiia shkiry ta khutra : [pidruchnyk] / V.A. Zhuravskyi, E.Ye. Kasian, A.H. Danylkovych. – K. : DALPU, 1996. – 744 s.

13. Spravochnyk kozhevnyka (Otdelka. Kontrol proyzvodstva) / pod red. N.A. Balberovoi. – M. : Lehprombытyzdat, 1987. – 256 s.

14. DSTU 4173.2003. Vyznachennia hostroi letalnoi toksychnosti na Daphnia Magna Straus ta Ceriodaphnia Affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea). – K., 2004. – 10 s.

15. Nikonova A.V. Zastosuvannia metodu biotestuvannia dlia vyznachennia toksychnosti vidpratsovanykh rozchyniv shkirianoho vyrobnytstva / A.V. Nikonova, O.A. Andreieva, L.A. Maistrenko // Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-prakt. konf. «Chysta voda. Fundamentalni, prykladni ta promyslovi aspekty», 26–28 zhovtnia 2016 r., Kyiv. – K. : Nats. tekhn. un-t Ukrainy «KPI im. I. Sikorskoho», 2016. – S. 141–143.

Рецензія/Peer review : 08.09.2017 р. Надрукована/Printed :27.10.2017 р.
Рецензент: проф. Мокроусова О.Р.

УДК 685.31.02

Т.В. ІВАНІШЕНА, М.В. ХРУЩ
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗПЕЧНОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі представлені дослідження з екологічної безпечності полімерних пакувальних матеріалів. У якості об'єктів дослідження використані пакувальні матеріали, які найбільш широко представлені на ринку України. Запропонована комплексна методика оцінки екобезпечності упаковки з використанням фізико-хімічних та біологічних методів. Дослідження проводились з використанням біо-тест-об'єктів: Chlorellavulgaris Beijer, Triticum L., Avena satia L., Hordeumvulgare. Оцінка та аналіз екологічної безпечності проводили за такими критеріями: токсична кратність розведення, порогове (Lim R) та ефективне розведення(ER50) і допустима кількість міграції.

Ключові слова: пакувальні матеріали, біотестування, токсична кратність розведення, порогове та ефективне розведення, допустима кількість міграції.

T.V. IVANISHENA, M.V. KHRUSH
Khmelnytsky National University

RESEARCH OF THE SAFETY OF POLYMERIC PACKAGINGMATERIALS

The purpose of research is to studies on the ecological safety of polymer packaging materials. As objects of research, the packaging materials are used, which are most widely represented in the Ukrainian market. The proposed complex methodology for assessing the integrity of packaging using physical-chemical and biological methods. The studies were carried out using bio-testobjects: Chlorellavulgaris Beijer, Triticum L., Avenasatia L., Hordeumvulgare. As a result of the studies, the safety indicators of polymer packaging materials were determined, namely, the increase or decrease in the amount of the culture test of Chlorellavulgaris Beijer, the change in the optical density of solutions with culture; percentage of germination, length of maximum shoots, roots of phyto-testobjects; concentration of harmful substances in extracts. Assessment and analysis of environmental safety were carried out according to the following criteria: toxic dilution multiplicity, threshold (Lim R) and effective dilution (ER50) and allow able migration amount.

Keywords: packaging materials, biotesting, toxic multiplicity of breeding, threshold and effective dilution, allow able amount of migration.

Постановка проблеми

Сучасна упаковка є обов'язковим компонентом розвинутого промислового виробництва. Одержання пакувальних матеріалів охоплює практично всі галузі промисловості від металургії до виготовлення полімерів.

Для отримання пакувальних матеріалів можуть використовуватися різні складові: полімери, папір, картон, метал, скло, дерево, текстиль. Найбільша частка використання припадає на полімерні матеріали, асортимент виробів з яких безперервно розширюється. Але така упаковка не завжди є безпечною та не завжди відомий її склад.

Основні гігієнічні вимоги до виробів, що контактують з харчовими продуктами, полягають в тому, що матеріал не повинен впливати на органолептичні властивості харчового продукту, тобто змінювати колір, надавати сторонній запах або присмак їжі; не повинна відбуватися міграція в харчовий продукт складових пакувальних матеріалів у кількостях, небезпечних для здоров'я [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Щороку в Україні накопичується близько 600 мільйонів тонн відходів, у тому числі значна частина використаної тари та упаковки.

На рис. 1 наведено спектр використання різних видів пакувальних матеріалів у світі [2].

Полімери становлять вагому і всезростаючу частку у виготовленні пакувальних матеріалів [3]. Споживання полімерної упаковки зростає високими темпами, це пов'язано з низкою таких переваг: низька питома маса при відносно високій щільності; хімічна інертність; низька крихкість; легкість фарбування; висока технологічність; взаємозамінність [3].

На рис. 2 наведена кількісна характеристика використання полімерної упаковки у світі [3].

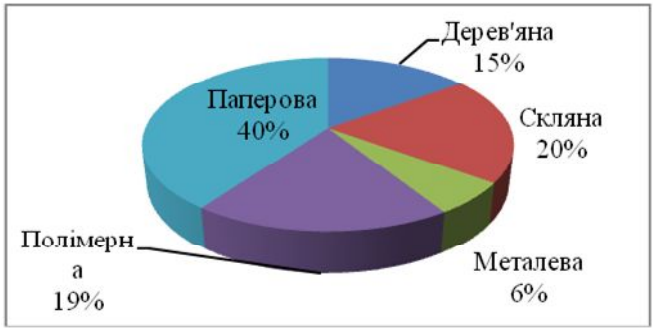


Рис. 1. Використання упаковки у світі

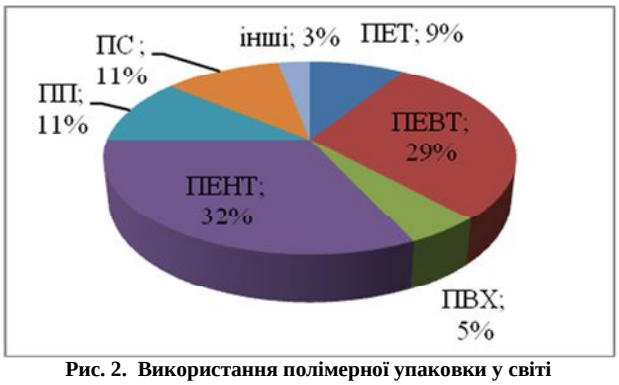


Рис. 2. Використання полімерної упаковки у світі

Однак у цього виду тари є деякі недоліки: старіння під дією кисню повітря, агресивних середовищ, сонячного світла (фотостаріння); поява стороннього запаху у продукції від даного виду упаковки; труднощі розпізнавання полімерів при утилізації; можливість міграції органічних сполук в продукт (полівінілхлориду, полістиролу тощо).

Полімерні матеріали, з яких в процесі синтезу і переробки отримують упаковку, являють собою багатокомпонентну систему, що містить, зокрема, і шкідливі для людського організму продукти. Навіть у композиції моноплівок присутній не тільки базовий полімер, але й низькомолекулярні продукти його синтезу: залишкові мономери, каталізатори, ініціатори та інше. Крім того, можуть містити різні цільові добавки, що вводяться в процесі переробки: пластифікатори, стабілізатори, інгібітори, наповнювачі, барвники, пом'якшувачі, а також сполуки важких металів.

При тривалому контакті упаковки з продуктом всі перераховані вище компоненти можуть мігрувати в продукт, а з нього – в шлунок людини. Наслідки такої міграції, на жаль, можуть виявлятися тільки через тривалий час. І щоб відчувати себе в безпеці, необхідно знати про вплив компонентів упаковки на фізіологію людини. Це особливо важливо при виборі упаковки для продуктів, що є екстрагентами для низькомолекулярних сполук, як, наприклад, жировмісні продукти [4].

Гігієнічні вимоги, які висуваються до полімерної упаковки, що контактує з харчовими продуктами, визначаються різними факторами.

По-перше, токсичністю. У склад полімерного пакувального матеріалу не повинні входити речовини, що володіють високою токсичністю.

По-друге, кумулятивними властивостями і специфічною дією на організм людини (канцерогенною, мутагенною, алергенною).

По-третє, хімічно інертним по відношенню до продукту пакувальним матеріалом (він не повинен змінювати органолептичних властивостей продукту і виділяти хімічних речовин в дозах, що перевищують допустимі рівні).

Основні параметри, що впливають на міграцію компонентів пакувального матеріалу: природа пакувального матеріалу і контактуючого середовища, площа контакту упаковки, час контакту і температура. Також міграції сприяють механічне напруження (зокрема, вібрація під час транспортування) [5].

Основними етапами санітарно-гігієнічних досліджень нових пакувальних матеріалів є органолептична оцінка, санітарно-хімічні дослідження, токсикологічна оцінка на тваринах.

Мета і завдання досліджень

Метою даної роботи є визначення екологічної токсичності полімерних матеріалів різними методами включаючи біотестування пакувальних матеріалів для харчових продуктів. Для цього необхідно вирішити ряд завдань:

1) розглянути асортимент сучасних пакувальних матеріалів;
2) проаналізувати існуючі методи та обрати методики визначення екологічності матеріалів;
3) провести експериментальні дослідження спектру упаковок з використанням різних тест-об'єктів;
4) провести порівняльний аналіз результатів та надати рекомендації щодо безпечності упаковки.

Виклад основного матеріалу

В якості об'єктів дослідження були вибрані різні види полімерних пакувальних матеріалів, а саме: поліетилентерефталат, поліетилен високого тиску, полівінілхлорид, поліпропілен, полістирол (таблиця 1).

Модельним середовищем (екстрагентом) для екстракції хімічних речовин з упаковки є дистильована вода з початковим рівнем pH від 6,1 до 7,2. Дослідження безпечності пакувальних матеріалів проводили методами біотестування [6, 7] на різних тест-об'єктах (Chlorellavulgaris Beijer, Triticum L., Avenasatia L., Hordeumvulgare) та класичними фізико-хімічними дослідженнями [8]. Екстрагування водних витяжок з полімерних пакувальних матеріалів проводили при оптимальному співвідношенні фаз "упаковка: екстрагент" 1:10, після інтенсивного розмішування колби з екстрактом упаковки відстоюються при кімнатній температурі протягом доби, а потім піддаються двогодинному струшуванні на апараті і фільтруванні [7]. Варіанти розведення отриманих проб – 1,3, 9, 27. Тривалість культивування біотест об'єктів у витяжках становить для Chlorellavulgaris Beijer – 72 години, для Triticum L., Avenasatia L., Hordeumvulgare – 7 діб. Основними показниками за якими встановлювали безпечність полімерних пакувальних матеріалів обрано приріст або зменшення кількості тест культури Chlorellavulgaris Beijer, зміна оптичної густини розчинів з культурою та визначення токсичної кратності розведення [9]. У випадку використання фіто тест об'єктів визначали відсоток їх проростання, довжину максимальних пагінців, корінців за якими встановлювали показники фітоефекту та параметри фіто токсичності Lim R та ER_{50} [9]. При виконання фізико-хімічних досліджень витяжок пакувальних матеріалів встановлювали концентрації шкідливих речовин.

Результати біотестування полімерних пакувальних матеріалів наведені на рис. 3.

Спостерігається однаковий характер спадання значень кривих 1, 2, 4 і крім того, спостерігається залежність "розведення-ефект". Крива 3 має характер зростання у межах похибки. На крива 5 різниця відносної густини зростає, що ймовірно пов'язане зі стимуляцією росту водоростей за рахунок присутніх у водних витяжках речовин, а надалі зі збільшенням розведення характер аналогічний всім іншим кривим. Так як відносна різниця оптичної густини не перевищує нормативні показники токсичності, тому можна припустити, що водні витяжки з полімерних пакувальних матеріалів не містять речовини, здатні викликати токсикологічний ефект у ChlorellavulgarisBeijer.

Таблиця 1

Об’єкти дослідження

Пакувальний матеріал	Назва	Виробник	Зображення
поліетилен терефталат (ПЕТ)	солодка газована вода “Караван”	Виробнича фірма “Панда”, “Урочище кабачок”, буд. 8, смт Стрижавка, Вінницька обл., Україна, 23210	
поліетилен високого тиску (ПЕВТ)	пакет поліетиленовий господарський з вирубними ручками	ТОВ “Арка пласт”, Україна, м. Київ, вул. Зрошувальна, 5	
полівініл хлорид (ПВХ)	плівка для харчових продуктів	-	
поліпропілен (ПП)	одноразовий посуд (стаканчики для напоїв)	-	
полістирол (ПС)	одноразовий посуд (тарілки)		

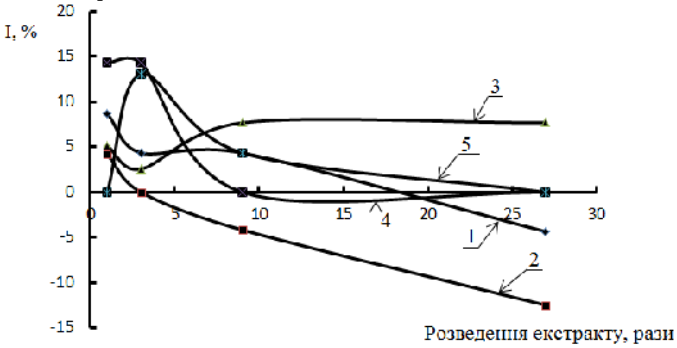
Проведено фітотестування за допомогою фіто тест-об’єктів Triticum L., Avenasatia L., Hordeumvulgare витяжок з пакувальних матеріалів на основі полімерів.

Для наочного спостереження за динамікою фітоефекту залежно від розведення екстракту водних витяжок з полімерних упаковок побудовано графіки залежності (рис. 4–8).

Фітотоксична дія спостерігається в Avenasatia L. у нативних екстрактах з ПЕТ та ПЕВТ упаковок, що зумовлена можливим вмістом формальдегіду у витяжках.

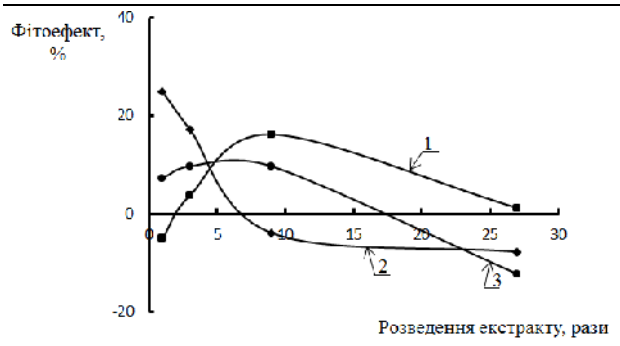
Найбільш чутливим тест-об’єктом є Triticum L., а найменшим – Avenasatia L.

Розраховані параметри фітотоксичності для полімерної упаковки. Результати яких наведені у табл. 2.

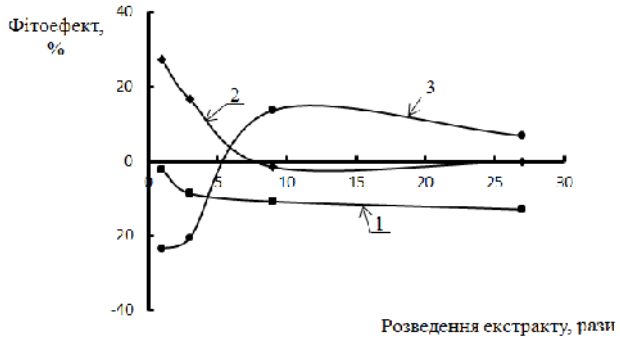


1 – ПЕТ; 2 – ПЕВТ; 3 – ПВХ; 4 – ПП; 5 – ПС

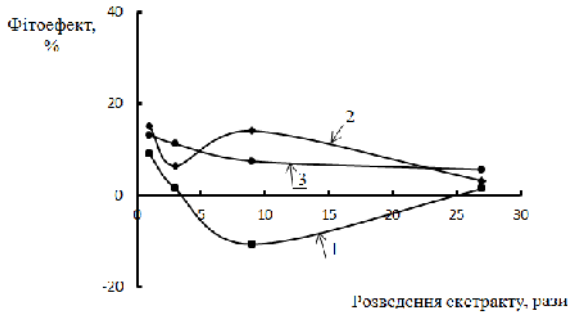
Рис. 3. Залежність відносної різниці величини оптичної густини I від розведення екстракту полімерних пакувальних матеріалів



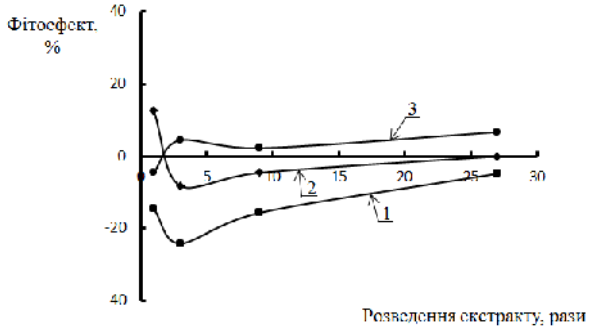
1 – Triticum L.; 2 – Avenasatia L.; 3 – Hordeumvulgare
Рис. 4. Залежність фітоефекту від розведення екстракту ПЕТ упаковки



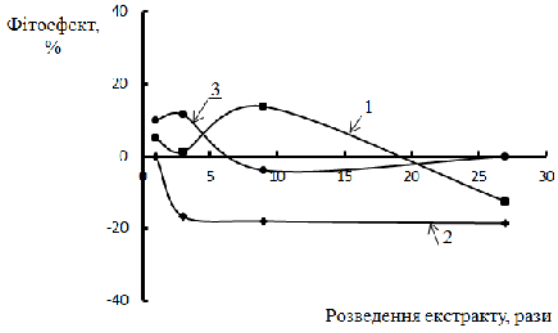
1 – Triticum L.; 2 – Avenasatia L.; 3 – Hordeumvulgare
Рис. 5. Залежність фітоефекту від розведення екстракту ПЕВТ упаковки



1 – Triticum L.; 2 – Avenasatia L.; 3 – Hordeumvulgare
Рис. 6. Залежність фітоефекту від розведення екстракту ПВХ упаковки



1 – Triticum L.; 2 – Avenasatia L.; 3 – Hordeumvulgare
Рис. 7. Залежність фітоефекту від розведення екстракту ПП упаковки



1 – Triticum L.; 2 – Avenasatia L.; 3 – Hordeumvulgare
Рис. 8. Залежність фітоефекту від розведення екстракту ПС упаковки

Таблиця 2

Пареметри фітотоксичності для полімерної упаковки

Упаковка	Фіто тест-об’єкти	Регресійне рівняння	Коефіцієнт кореляції	LimR	ER_{50}	Клас небезпеки
ПЕТ	Triticum L.	y = -0,0442·x - 0,2556	0,9885	0,0725	0,0034	4
	Avenasatia L.	y = -0,0372·x + 1,0012	0,9309	1,808	0,1380	4
	Hordeumvulgare	y = -0,0548·x – 0,7258	0,8204	0,4264	0,0097	4
ПЕВТ	Triticum L.	y = -0,1266·x - 0,3736	0,9152	0,0012	≈0	4
	Avenasatia L.	y = -0,0414·x + 1,1542	0,8691	2,1193	0,1214	4
	Hordeumvulgare	y = -0,0278·x - 0,877	0,727	0,0369	0,0054	4
ПВХ	Triticum L.	y = -0,0473·x + 0,4767	0,9808	0,3394	0,1293	4
	AvenasatiaL.	y = -0,1063·x + 1,5223	0,8152	0,2491	0,0002	4
	Hordeumvulgare	y = -0,1765·x + 2,3801	0,979	0,0708	≈0	4
ПП	Triticum L.	y = -0,049·x - 1,6821	0,9957	0,0022	0,00007	4
	Avenasatia L.	y = -0,1157·x - 1,4443	0,9966	0,0002	≈ 0	4
	Hordeumvulgare	y = -0,1074·x - 0,4762	0,7038	0,0024	≈ 0	4
ПС	Triticum L.	y = -0,0783·x + 0,7735	0,9829	0,0808	0,0004	4
	Avenasatia L.	y = -0,0426·x -0,0154	0,808	0,1150	0,0072	4
	Hordeumvulgare	y = -0,1105·x + 0,864	0,5404	0,0451	0,00002	4

Середньоефективне розведення для усіх тест-об'єктів менші за 1 і фітотоксичний ефект зафіксований тільки при дії нативного екстракту, а його розведення не мають впливу на тест-об'єкти, тому полімерній упаковці присвоюється 4 клас небезпеки – малонебезпечні.

Проведено визначення концентрації шкідливих речовин (С) в екстрактах полімерних пакувальних матеріалів фізико-хімічними методами. Основним критерієм, за яким проводилась оцінка екологічної безпечності пакувальних матеріалів, є допустима кількість міграції (ДКМ) (табл. 3).

Таблиця 3

Концентрації шкідливих речовин, які містяться у полімерній упаковці

Упаковка	Шкідливі речовини	С, мг/л	ДКМ, мг/л	$\frac{C}{ДКМ}$
ПЕТ	формальдегід	0,0009	0,1	0,009
	етилацетат	0,01	0,1	0,1
	ацетон	0,02	0,1	0,2
	метиловий спирт	0,013	0,2	0,065
	пропіловий спирт	0,01	0,1	0,1
	ізопропіловий спирт	0,01	0,1	0,1
	бутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
	ізобутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
Разом:				0,614
ПЕВТ	формальдегід	0,0006	0,1	0,006
	етилацетат	0,018	0,1	0,18
	ацетон	0,054	0,1	0,54
	метиловий спирт	0,013	0,2	0,65
	пропіловий спирт	0,012	0,1	0,12
	ізопропіловий спирт	0,012	0,1	0,12
	бутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
	ізобутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
Разом:				1,656
ПВХ	вініл хлористий	0,007	0,01	0,7
	ацетон	0,044	0,1	0,44
	метиловий спирт	0,01	0,2	0,05
	пропіловий спирт	0,01	0,1	0,1
	ізопропіловий спирт	0,01	0,1	0,1
	бутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
	ізобутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
	цинк	0,21	1,0	0,21
Разом:				1,64
ПП	формальдегід	0,0005	0,1	0,005
	етилацетат	0,01	0,1	0,1
	ацетон	0,022	0,1	0,22
	метиловий спирт	0,01	0,2	0,05
	пропіловий спирт	0,01	0,1	0,1
	ізопропіловий спирт	0,01	0,1	0,1
	бутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
	ізобутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
Разом:				0,615
ПС	стирол	0,0016	0,01	0,16
	формальдегід	0,0004	0,1	0,004
	метиловий спирт	0,015	0,2	0,075
	бутиловий спирт	0,01	0,5	0,02
Разом:				0,259

У пакувальних матеріалах на основі полімерів знайдено шкідливі речовини, але їх концентрація менша за ДКМ, що відповідає основним вимогам, які висуваються до полімерних пакувальних матеріалів.

Висновки

Проаналізовано асортимент сучасних полімерних пакувальних матеріалів, їх властивості, переваги та недоліки.

Встановлено основні санітарно-гігієнічні та токсикологічні вимоги, що висуваються до пакувальних матеріалів, методи їх визначення та критерії оцінки. На підставі проведеного огляду сучасних методик по визначенню екологічності пакувальних матеріалів, для досліджень обрано біо-, фітотестування

та фізико-хімічні методи.

Досліджено вплив водних витяжок з полімерних пакувальних матеріалів на різні тест-об'єкти. З метою встановлення токсичності пакувальних матеріалів обрані показники: відносної різниці оптичної густини при проведенні біотестування; фітоефекту, порогу фітотоксичності, середньоефективного розведення при проведенні фітотестування; концентрація шкідливих речовин при проведенні фізико-хімічних досліджень.

Проведено біотестування пакувальних матеріалів з використанням Chlorellavulgaris Beijer. Встановлено, що показники відносної різниці оптичної густини найвищі у ПП упаковки (14,29%), але значення не перевищує критерій токсичності.

Проведено фітотестування за допомогою Triticum L., Avenasatia L., Hordeumvulgare. Встановлено вплив водних витяжок з пакувальних матеріалів на тест-об'єкти. Методом фітотестування встановлено, що найбільший фітоефект у ПЕВТ упаковки, що становить 27,27%. Найменше значення фітоефекту у ПП упаковки (12,73%). За критерієм токсичності ER_50 встановлено, що полімерна упаковка відноситься до 4 класу небезпеки. Виявлено, що найчутливішим тест-об'єктом є Triticum L., який найкраще підходить для проведення досліджень.

За допомогою фізико-хімічних методів встановлено, що відношення концентрації знайденої речовини у водних витяжках до значень ДКМ найбільше у ПЕВТ упаковки, яке становить 1,656, а найменше у ПС упаковки – 0,259.

Література

1. Сирохман І. В. Товарознавство пакувальних товарів і тари : підручник [для студ. вищ. навч. закл.] / І. В. Сирохман, В. М. Завгородня. – К. : Центр учбової літератури, 2009. – 616 с.
2. Packaging waste statistic [Електронний ресурс] : стаття. – Режим доступу : http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/ index.php/Packaging_ waste_statistics.html.
3. Plastics in Packaging [Електронний ресурс] : стаття. – режим доступу : http://www.eng.buffalo.edu/courses/ce435/2001ZGu/Plastics_Packaging/ PlasticsPackagingReport.htm.
4. Любешкина Е.В. Миграционная политика. За безопасность связей с упаковочным материалом / Е.В. Любешкина // Пакет. – 2004. – № 5. – С. 4–11.
5. Франс Локс, Упаковка и екология : учебное пособие / пер. с англ. О.В. Наумовой ; под ред. В.А. Наумова. – М. : Изд-во МГУП, 1999. – 220 с.
6. Біотестування. Сучасний стан практичного використання [Електронний ресурс] : стаття. – Режим доступу : www.kdu.edu.ua/statti/2006-6-1(41)/142.doc.html.
7. Методические рекомендации по обоснованию класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности : МР 2.1.7.2297-07. – [Действует с 2007-28-10]. – М., 2007. – 9 с.
8. Методические указания по осуществлению государственного санитарного надзора за производством и применением полимерных материалов класса полиолефинов, предназначених для контакта с пищевыми продуктами : МУ 4149-86. – [Действует с 1986-20-09]. – М., 1986. – 14 с.
9. Іванішена Т.В. Альтернативні методи санітарно-хімічних досліджень текстильних матеріалів / Т.В. Іванішена, О.О. Гиляка // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 6. – С. 95–100.

References

1. Syrokhman I. V. Tovaroznavstvo pakuvalnykh tovariv i tary: pidruchnyk [dlia stud. vyshch. navch. zakl.] / I. V. Syrokhman, V. M. Zavhorodnia. — K.: Tsentr uchbovoi literatury, 2009. — 616 s.
2. Packaging waste statistic [Elektronnyi resurs]: stattia. – rezhym dostupu do statti: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/ index.php/Packaging_ waste_statistics.html.
3. Plastics in Packaging [Elektronnyi resurs]: stattia. – rezhym dostupu do statti: http://www.eng.buffalo.edu/courses/ce435/2001ZGu/Plastics_Packaging/ PlasticsPackagingReport.htm.
4. Liubeshkyna E.V. Myhratsyonnaia polytyka. Za bezopasnost sviazei s upakovochnym materyalom / E.V. Liubeshkyna // Paket. – 2004. - № 5. – S. 4-11.
5. FransLoks, Upakovka y ekolohyia: Uchebnoe posobye / Per. sanhl. O.V. Naumovoi pod red. V.A. Naumova. M. : Yzd-vo MHUP, 1999 - 220 s.
6. Biotestuvannia. Suchasnyi stan praktychnoho vykorystannia [Elektronnyi resurs]: stattia. – rezhym dostupu do statti: www.kdu.edu.ua/statti/2006-6-1(41)/142.doc.html.
7. Metodycheskye rekomendatsyy po obosnovanyiu klassa opasnosty otkhodov proyzvodstva ypotreblenyia pofytotoksychnosty. : MR 2.1.7.2297-07. – [Deistvuet s 2007-28-10]. – M. , 2007. – 9 s.
8. Metodycheskye ukazanyia po osushchestvlenyiu hosudarstvennoho sanytarnoho nadzora za proyzvodstvom y prymenenyem polymernykh materyalov klassa polyolefynov, prednaznachenykh dlia kontakta s pyshchevymy produktamy: MU 4149-86. – [Deistvuet s 1986-20-09]. – M., 1986. – 14 s.
9. Ivanishena T.V. Alternatyvni metody sanitarno-khimichnykh doslidzhen tekstylnykh materialiv / T.V. Ivanishena, O.O. Hyliaka // Herald of Khmelnytsky National University. – 2014. – № 6. - S. 95-100.

Рецензія/Peer review : 21.09.2017 р. Надрукована/Printed :24.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Карван С.А.

УДК 677.84

А.Н. КУНИК, Д.Г. САРИБЕКОВА, Р.С. СЕРВЕТНИК, Г.С. САРИБЕКОВ
Херсонский национальный технический университет

ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ С МАКРОМОЛЕКУЛОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В статті проведені дослідження, направлені на визначення механізму взаємодії катіоноактивних полімерів з макромолекулою целюлози із застосуванням сучасного апаратного методу – інфрачервоної спектроскопії. На основі аналізу спектрофотометричного дослідження зразків бавовняної тканини визначено, що отримані спектральні зміни є результатом хімічної ковалентної взаємодії катіонних полімерів з гідроксильними групами целюлози, а також зниженням кристалічності структури полімеру і підвищенням його впорядкованості.

Ключові слова: катіонні полімери, целюлоза, ІЧ-спектри.

A. KUNIK, D. SARIBYEKOVA, R. SERVETNIK, H. SARIBEKOV
Kherson National Technical University

INFRARED SPECTROSCOPIC STUDY OF CATIONIC POLYMER NATURE OF THE INTERACTION WITH MACROMOLECULES CELLULOSE

The article is devoted to the determination of the mechanism of interaction of cationic polymers with the cellulose macromolecule with the use of the modern hardware method – infrared spectroscopy. The investigations were carried out on Bruker's Infrared Fourier Spectrometer Vertex-70 using a diamond crystalline anti-aliasing device. On the basis of the analysis of spectral-photometric research of samples of cotton fabric, it was determined that the obtained spectral changes are the result of chemical covalent interaction of cationic polymers with hydroxyl groups of cellulose, as well as a decrease in the crystallinity of the structure of the polymer and an increase in its orderliness.

Keywords: cationic polymers, cellulose, IR spectra.

Постановка проблемы

Несмотря на динамический рост производства синтетических волокнообразующих полимеров, целлюлозные волокна составляют 40–50% от общего применения текстильных волокон [1, 2] и имеют широкое потребительское использование. Повышенный интерес к хлопчатобумажным текстильным материалам обусловлен хорошими гигиеническими и потребительскими свойствами готовых изделий на их основе [3].

Среди всех классов красителей, способных к образованию окрасок на целлюлозных волокнах (прямые, кубовые, сернистые, пигментные и др.), наибольшее применение находит класс сравнительно молодых (около 60 лет) активных красителей, имеющих широкую цветовую гамму, высокие показатели устойчивости окрасок к мокрым обработкам и трению [4].

Активные красители – это единственный класс красителей, образующих ковалентную связь с волокном, что существенно отличает их от других красителей, которые фиксируются на волокне ионными или водородными связями, а также связями за счет сил Ван-дер-Ваальса [5].

Ковалентная связь является крайним и частным случаем химической связи, для которой характерно полное обобщение двух электронов, одновременно и в одинаковой мере принадлежащих обоим атомам, которые участвуют в образовании связи.

Активные красители, пригодные для практического использования по различным способам, должны обеспечивать протекание химического взаимодействия с волокнистыми материалами на уровне не ниже 80% с образованием яркой, насыщенной окраски с высокими показателями устойчивости к физико-химическим воздействиям.

На практике степень фиксации активных красителей находится в пределах 60–70% (в зависимости от технологии крашения). Еще одним весомым недостатком является использование высоких концентраций текстильно-вспомогательных веществ – нейтральных электролитов, закрепителей окраски [6]. Поэтому актуальным является поиск наиболее рационального способа колорирования хлопчатобумажного текстильного материала, позволяющего повысить степень ковалентной фиксации красителя на волокне при полном исключении нейтрального электролита из состава красильного раствора.

Анализ последних исследований и публикаций

Изыскание путей интенсификации крашения при одновременном повышении степени полезного использования красителей и снижения уровня загрязнения окружающей среды является задачей чрезвычайно актуальной. При интенсификации химико-технологического процесса следует учитывать его особенности. Если технологию крашения можно отнести к капиллярно-диффузной схеме, когда количество прибывшего капиллярной транспортировкой вещества достаточно для придания минералу нужных свойств (цвета, чистоты, устойчивости и др.), и после кратковременного пребывания в растворе материал направляется в устройство для осуществления фиксации красителя (его диффузии внутрь волокна, закрепления и др.), то способы интенсификации должны быть направлены на подготовку материала, измельчение и дезагрегацию частиц красителя в растворе. Здесь можно выделить физические и химические

способы воздействия на материал и растворитель [7].

Изменением состава красильных ванн, поддерживанием температуры крашения на оптимальном уровне можно достаточно полно реализовать возможности интенсификации крашения за счет создания высокой активности молекул красителей. Другим подходом к созданию высокоскоростных способов колорирования хлопчатобумажных текстильных материалов является использование активации ткани и молекул красящих веществ в условиях высокочастотного и микроволнового нагрева, обработке ультразвуком, низкотемпературной плазмой, ультрафиолетовым излучением, гамма- и бетта-радиацией, магнитными полями. Применение этих нетрадиционных приемов позволяет в результате целенаправленного изменения свойств волокон и красителей при более низком уровне термической активации процесса фиксации получить такие результаты по скорости и степени закрепления красителей, качеству окраски и свойствам текстильного материала, которые при традиционных способах нагрева в ряде случаев недостижимы. Однако, следует отметить, что данные способы не находят широкого применения в виду сложного аппаратурного оформления.

Более эффективным является использование катионных полимеров – производных полиаминов, не содержащих формальдегид.

В ранее проведенной работе [8] нами установлено, что предварительное аппретирование хлопчатобумажной ткани растворами катионных полиэлектролитов Каустамин-15 и ВПК-402 повышает интенсивность окраски активных красителей, позволяет проводить крашение по периодической технологии без использования соли как электролита.

Формулирование цели исследования

Цель данной работы заключалась в изучении характера взаимодействия катионоактивных полимеров с макромолекулой целлюлозы.

Изложение основного материала

С целью изучения механизма взаимодействия катионоактивных препаратов с макромолекулой целлюлозы в работе проводили исследования с применением современного аппаратного метода – инфракрасной спектроскопии, что позволяет определить механизм действия исследуемых соединений. Исследования осуществляли на инфракрасном Фурье-спектрометре Vertex-70 компании Bruker с помощью приставки НПВО с алмазным кристаллом.

Как известно [9], хлопчатобумажный текстильный материал на 95–98% состоит из целлюлозы, одного из наиболее распространённых биополимеров. Элементарное звено макромолекулы целлюлозы находится в конформации кресла с экваториально расположенными группами –OH и –CH_2OH (рис. 1).

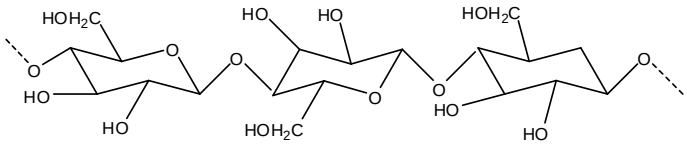


Рис. 1. Схема строения элементарного звена целлюлозы

Конформация макромолекулы целлюлозы представляет собой жёсткую спираль, стабилизированную внутримолекулярными водородными связями. Наличие большого количества межмолекулярных и внутримолекулярных водородных связей проявляется на ИК-спектре в виде интенсивной широкой полосы в области 3400–3200 $см^{-1}$ (валентные колебания) [10], а также в виде ряда близлежащих полос деформационных колебаний O–H в области 1150–1000 $см^{-1}$ [11]. В этой области находятся и полосы валентных колебаний C–O–C. Кроме того, в спектре наблюдается уширенная полоса валентных (третичных) C–H колебаний при 2890±10 $см^{-1}$, а также деформационные C–H колебания в области 1340 $см^{-1}$ [12]. Ряд перекрывающихся полос в области 660 – 400 $см^{-1}$ относится к скелетным колебаниям. Полное отнесение полос в спектре целлюлозы отражено в работе [13].

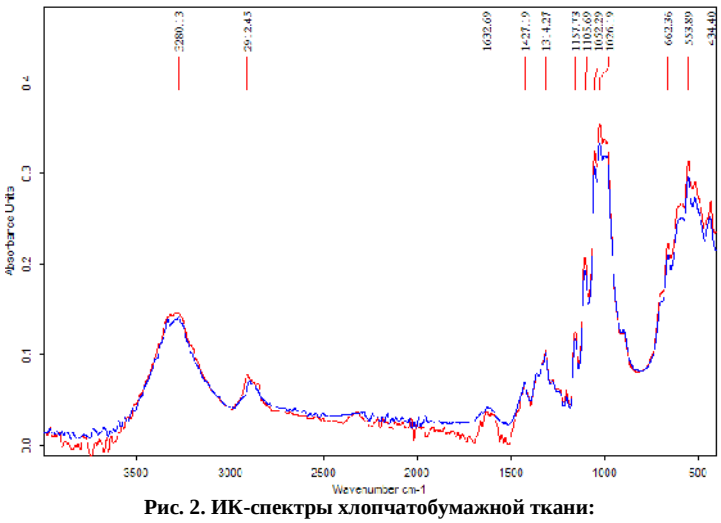


Рис. 2. ИК-спектры хлопчатобумажной ткани:
- – неокрашенной, – – окрашенной активным красителем Novacron Ruby S-3B

Таким образом, по предположению, что взаимодействие красителя с целлюлозной матрицей осуществляется преимущественно по гидроксильным группам, следует ожидать, что изменения в ИК-спектре будут наблюдаться в области колебаний OH-групп, тогда как

полосы колебаний С–Н групп должны оставаться без изменений. Исходя из выше изложенного, ИК-спектры хлопчатобумажной ткани нормировались по полосам деформационных С–Н колебаний в области 1300 см$^{-1}$.

На рис. 2 представлены ИК-спектры хлопчатобумажной ткани, неокрашенной и окрашенной активным красителем Novacron Ruby S-3B.

Окрашивание красителем Novacron Ruby S-3B модифицирует структуру ткани – полоса валентных колебаний гидроксильных групп (3280 см$^{-1}$) не только несколько возрастает по интенсивности, но и форма этой полосы также претерпевает изменения (рис. 2). Одновременно возрастают интенсивности сложных полос, в состав которых входят деформационные δ (OH) колебания. Рост интенсивности полосы при 1105 см$^{-1}$ (валентное колебание глюкопиранозного кольца (ν_{ai})) указывает на увеличение количества этих структурных элементов, тогда как полосы при 1026 и 901 см$^{-1}$, которые отвечают, соответственно, антисимметрическому (ν_{as}) и симметрическому (ν_s) валентным колебаниям мостиковой группы С–О–С, также возрастают по интенсивности. Увеличение интенсивности полос при 526–434 см$^{-1}$ указывает на возрастание межкристаллического взаимодействия в полимере.

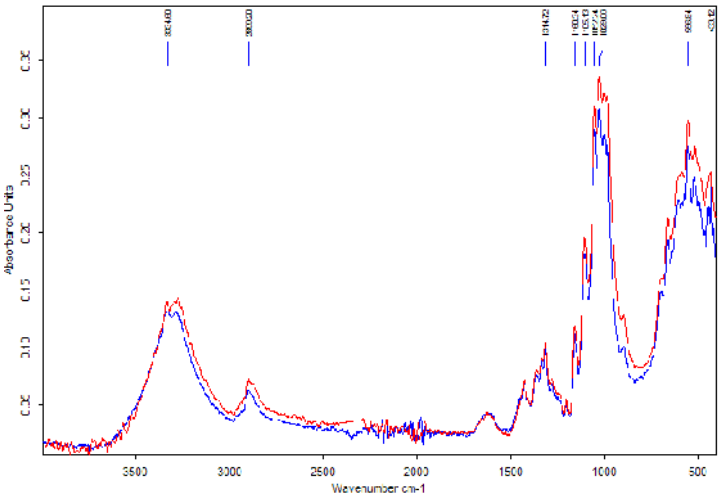


Рис. 3. ИК-спектры хлопчатобумажной ткани:
- – необработанной, - – обработанной препаратом Каустамин-15

На рис. 3 представлены ИК-спектры текстильного материала, необработанного и обработанного препаратом Каустамин-15 концентрацией 20 г/л.

Согласно рис. 3, при обработке хлопчатобумажной ткани препаратом Каустамин-15 интенсивность полосы валентных колебаний гидроксильных групп (ν(OH) = 3335 см$^{-1}$) незначительно снижается, при этом интенсивность полос в области 1158–1025 см$^{-1}$ и 600–400 см$^{-1}$ резко уменьшается. Полоса при 1159 см$^{-1}$ является составной полосой деформационных колебаний гидроксильных δ(OH) и метиленовых δ(CH_2) групп, полоса при 1105 см$^{-1}$ отвечает валентному колебанию глюкопиранозного кольца (ν_{ai}), тогда как полосы при 1026 см$^{-1}$ и 901 см$^{-1}$ отвечают, соответственно, антисимметричному (ν_{as}) и симметричному (ν_s) валентным колебаниям мостиковой группы С–О–С. Таким образом, обработка ткани катионным полимером приводит к химической модификации гидроксильных групп, что выражается в снижении интенсивности их валентных и деформационных колебаний. Снижение интенсивности полосы при 901 см$^{-1}$ свидетельствует о снижении кристалличности структуры. Полосы при 526–434 см$^{-1}$ являются полосами кристаллического полимера. Таким образом, уменьшение интенсивности указанных полос является следствием снижения упорядоченности структуры полимера и его кристалличности.

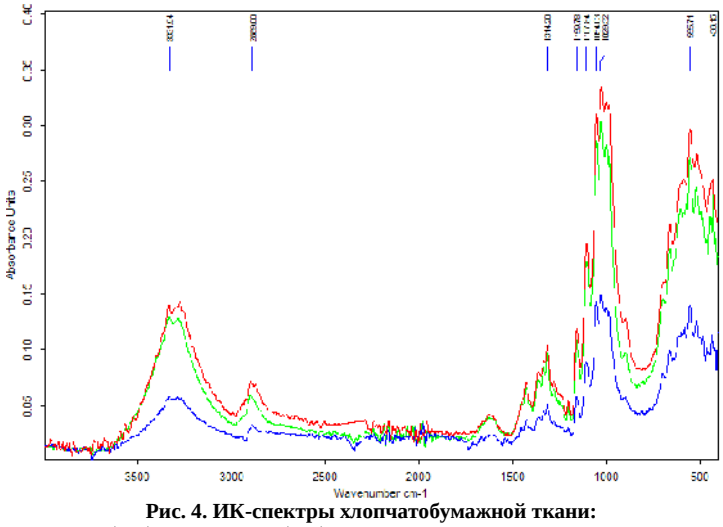


Рис. 4. ИК-спектры хлопчатобумажной ткани:
- – необработанной, - – обработанной препаратом Каустамин-15; - – окрашенной по предложенной безэлектролитной технологии

На рис. 4 представлены ИК-спектры хлопчатобумажной ткани, обработанной катионоактивным препаратом Каустамин-15 и окрашенной активным красителем Novacron Ruby S-3B без применения соли.

Согласно данным, представленным на рис. 4, при крашении ткани, обработанной катионным препаратом Каустамин-15, красителем Novacron Ruby S-3B наблюдается резкое снижение интенсивности полос валентных колебаний ν(OH) при 3294 см$^{-1}$, а также интенсивность полос в области 1158–1025 см$^{-1}$ и 600–400 см$^{-1}$. Подобные спектральные изменения являются результатом, во-первых, химического взаимодействия красителя и катионного полимера с гидроксильными группами ткани, а во-вторых, снижения кристалличности структуры полимера и его упорядоченности.

На рис. 5 представлены ИК-спектры хлопчатобумажной ткани, необработанной и обработанной препаратом ВПК-402 концентрацией 7 г/л.

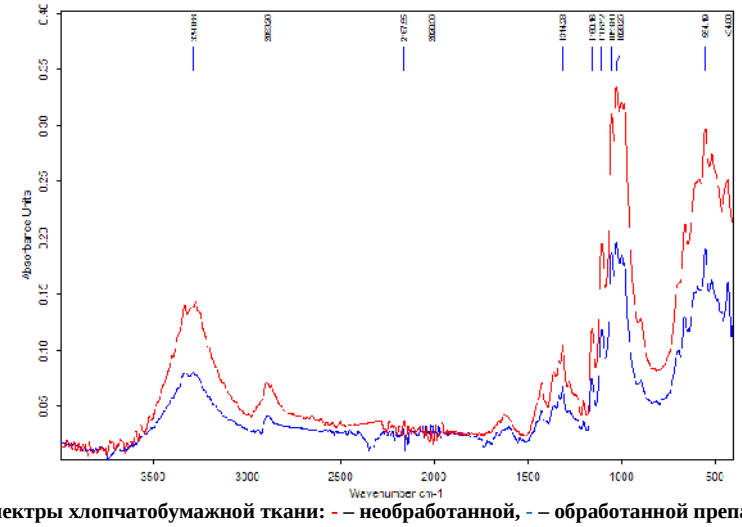


Рис. 5. ИК-спектры хлопчатобумажной ткани: - – необработанной, - – обработанной препаратом ВПК-402

Данные, представленные на рис. 5, показывают, что эффект обработки хлопчатобумажного текстильного материала катионным препаратом ВПК-402 по воздействию сравним с суммарным эффектом обработки ткани катионным препаратом Каустамин-15.

На рис. 6 представлены ИК-спектры хлопчатобумажной ткани, обработанной катионоактивным препаратом ВПК-402 и окрашенной по предложенной технологии активным красителем Novacron Ruby S-3B.

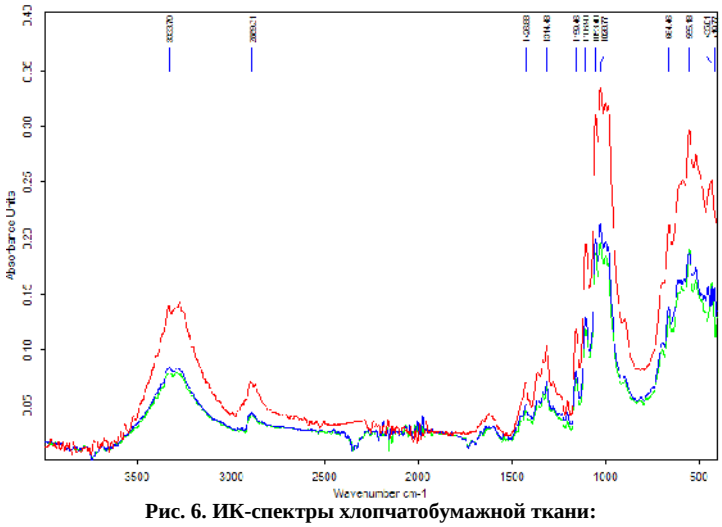


Рис. 6. ИК-спектры хлопчатобумажной ткани:
- – необработанной, - – обработанной препаратом ВПК-402; - – окрашенной по предложенной безэлектролитной технологии

Согласно ИК-спектрам, приведенным на рис. 6, основная модификация целлюлозного материала осуществляется с помощью пропитки ткани препаратом ВПК-402, а не в результате ее окрашивания.

Таким образом, на основании спектрофотометрического исследования образцов хлопчатобумажной ткани можно сделать вывод, что при крашении текстильного материала, обработанного растворами катионных препаратов, наблюдается резкое снижение интенсивности полос валентных колебаний ν(OH) при 3294 см$^{-1}$, а также интенсивности полос в области 1158–1025 см$^{-1}$ и 600–400 см$^{-1}$. Подобные спектральные изменения являются результатом, во-первых, химического взаимодействия красителя и катионного полимера с гидроксильными группами ткани, а во-вторых, снижения кристалличности структуры полимера и его упорядоченности.

Вероятный механизм предложенной безэлектролитной технологии крашения хлопчатобумажного текстильного материала активными красителями представлен на рис. 7.

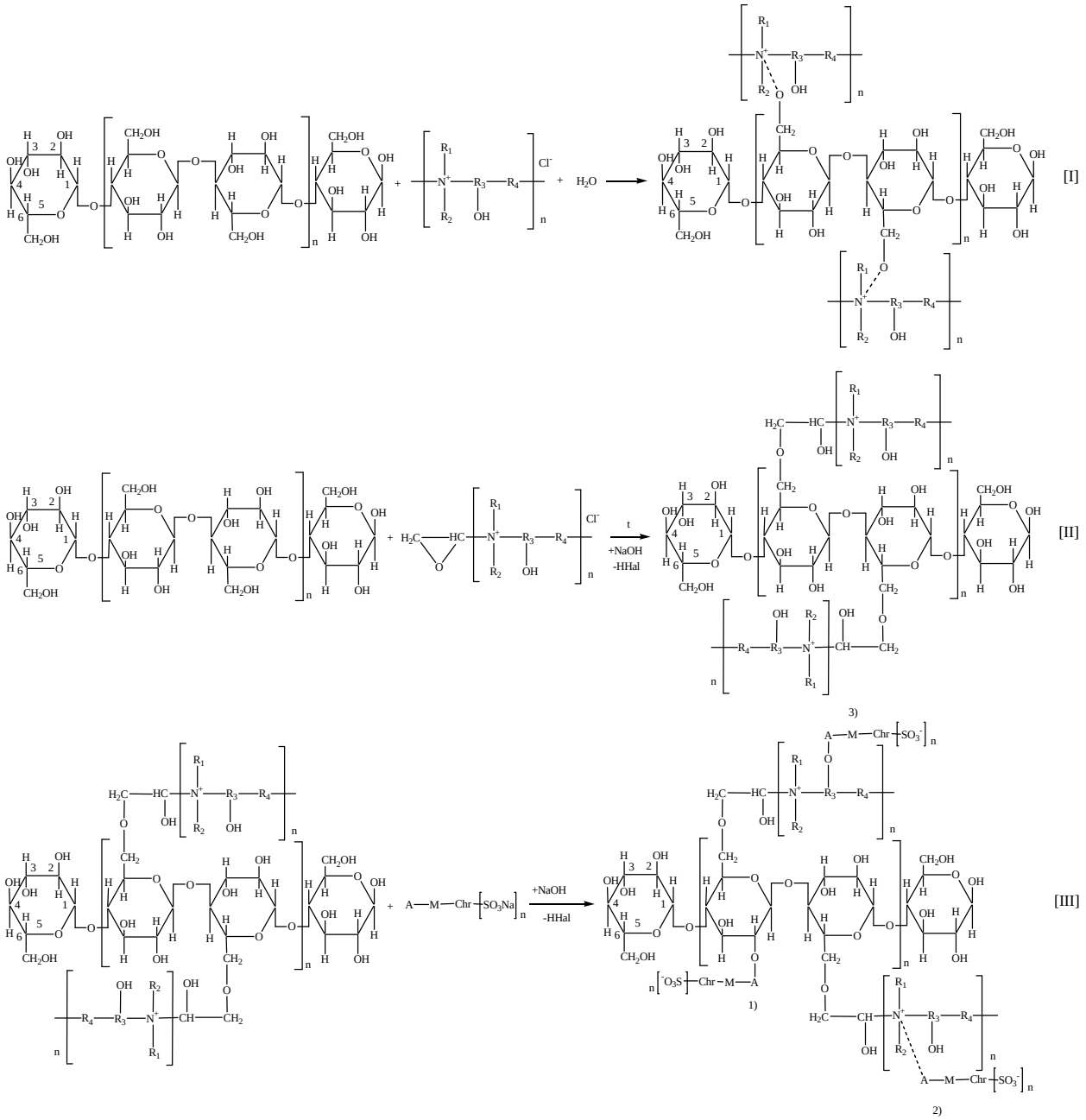


Рис. 7. Вероятный механизм действия предложенной безэлектролитной технологии: R_1, R_2, R_3, R_4 – алкильные радикалы

Согласно представленным данным (рис. 7), при осуществлении первой стадии безэлектролитной технологии крашения, включающей пропитку хлопчатобумажной ткани растворами катионных полимеров, последние фиксируются волокном посредством электростатического взаимодействия, которое возникает между отрицательно заряженным целлюлозным волокном и положительно заряженными катионными препаратами.

На следующей стадии, которая состоит из крашения катионизированного целлюлозного волокна активными красителями при температуре 60°С и pH=10,7 – 10,8, катионные препараты, содержащие остатки эпихлоргидрина, под действием щелочи ковалентно фиксируются волокном концевыми эпоксидными группами (II). Следует отметить, что модификация целлюлозного волокна происходит главным образом на первичных гидроксильных группах целлюлозы, расположенных у шестого углеродного атома, что обусловлено их большей стерической доступностью и нуклеофильностью.

Активные красители фиксируются как за счет ковалентного взаимодействия, возникающего между гидроксильными группами целлюлозы (1) и катионоактивных препаратов (3), так и за счет электростатических сил (2), которые образуются между отрицательно заряженными активными красителями и положительно заряженными катионными полимерами (III).

Выводы

Анализ спектрофотометрического исследования образцов хлопчатобумажной ткани показал, что полученные спектральные изменения являются результатом химического ковалентного взаимодействия красителя и катионных полимеров с гидроксильными группами целлюлозы, а также снижения

кристалличности структуры полимера и повышения его упорядоченности.

Литература

1. Wood L. Research and markets: Textile materials – global strategic business report – 2011. Profiles 414 companies including many key and niche players up to 2015 / L. Wood. – Dublin: Business wire, 2011. – 425 p.

2. Карпов В.В. Активные красители в СССР и в России / В.В. Карпов // Текстильная химия. – 2004. – № 3 (12). – С. 9–12.

3. Chemical and dyes [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.dyespigments.com/textile-dyes.html.

4. Киселёв А.М. Экологические аспекты процессов отделки текстильных материалов / А.М. Киселёв // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 20–30.

5. Мельников Б.Н. Роль текстильных вспомогательных веществ. Прогресс текстильной химии и технологии / Б.Н. Мельников // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2002. – т. XLVI, № 1. – С. 9–19.

6. Смирнова О.К. Вспомогательные вещества в химико-текстильных процессах. Современный ассортимент отечественных текстильных вспомогательных веществ / О.К. Смирнова, Н.П. Пророкова // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2002. – т. XLVI, № 1. – С. 88–95.

7. Баданов К.И. Использование воды, активированной электромагнитными полями, при крашении шерсти хромовыми красителями / К.И. Баданов, Т.С. Новорадовская, В.И. Чеснокова, С.И. Меерсон, А.Г. Новорадовский // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 1989. – № 4. – С. 70–73.

8. Сарибекова Д.Г. Сравнение эффективности применения предварительной и заключительной обработки ткани катионными полимерами при крашении прямыми красителями / Д.Г. Сарибекова, А.Н. Куник, В.А. Коваленко, Г.С. Сарибеков // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2016. – № 2. – С. 65–70.

9. Роговин З.А. Химия целлюлозы / З.А. Роговин. – М. : Химия, 1972. – 519 с.

10. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами. – М. : Издательство зарубежной литературы, 1963. – 591 с.

11. Кросс А. Введение в практическую инфракрасную спектроскопию / А. Кросс. – М. : Издательство зарубежной литературы, 1960. – 111 с.

12. Миронов В.А. Спектроскопия в органической химии / В.А. Миронов, С.А. Янковский. – М. : Химия, 1985. – 232 с.

13. Методы исследований древесины и ее производных / [под ред. Н.Г. Базариновой]. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та, 2002. – 26 с.

References

1. Wood L. Research and markets: Textile materials – global strategic business report – 2011. Profiles 414 companies including many key and niche players up to 2015. Dublin, Business wire, 2011, 425 p.

2. Karpov V.V. Aktyvne krasytely v SSSR y v Rossyy, *Tekstyl'naya khymyya*, 2004, №3 (12), pp. 9 – 12.

3. Chemical and dyes [Elektronnyiy resurs]. – Rezhym dostupa: http://www.dyespigments.com/textile-dyes.html (data obrascheniya: 07.10.2017).

4. Kyselev A.M. Ekolohycheskye aspekt protsessov otdelky tekstyl'nikh materyalov, *Ros. khym. zh. (Zh. Ros. khym. ob-va ym. D.Y. Mendeleeva)*, 2002, t. KhLVI, №1, pp. 20 – 30.

5. Mel'nykov B.N. Rol' tekstyl'nikh vspomohatel'nskh veshchestv. Prohress tekstyl'noy khymyy y tekhnolohyy, *Ros. khym. zh. (Zh. Ros. khym. ob-va ym. D.Y. Mendeleeva)*, 2002, t. KhLVI, №1, pp.9 – 19.

6. Smyrnova O.K., Prorokova N.P. Vspomohatel'nue veshchestva v khymyko-tekstyl'nukh protsessakh. Sovremennuy assortyment otechestvennukh tekstyl'nukh vspomohatel'nukh veshchestv, *Ros. khym. zh. (Zh. Ros. khym. ob-va ym. D.Y. Mendeleeva)*, 2002, t. KhLVI, №1, pp. 88 – 95.

7. Badanov K.Y., Novoradovskaya T.S, Chesnokova V.Y., Meerson S.Y., Novoradovskyy A.H. Yspol'zovanye vodu, aktyvyrovannoy elektromahnytnumy polyamy, pry krashenyy shersty khromovumy krasytelyamy, *Yzvestyya VUZov. Tekhnolohyya tekstyl'noy promushlennosty*, 1989, №4, pp. 70 – 73.

8. Sarybekova D.H., Kunyk A.N., Kovalenko V.A., Sarybekov H.S. Sravnenye effektyvnosty prymenenyya predvarytel'noy y zaklyuchytel'noy obrabotky tkany katyonnumy polymeramy pry krashenyy pryamumy krasytelyamy, *Vestnyk Sankt-Peterburhskoho hosudarstvennoho unyversyteta tekhnolohyy y dyzayna*, 2016, № 2, pp. 65–70.

9. Rohovyn Z.A. Khymyya tsellyulozu, Moscow, Khymyya, 1972, 519 p.

10. Bellamy L. Ynfrakrasnue spektru slozhnukh molekul, Moscow, Yzdatel'stvo zarubezhnoy lyteraturu, 1963, 591 p.

11. Kross A. Vvedenye v praktycheskuyu ynfrakrasnuyu spektroskopyyu, Moscow, Yzd. zarubezhnoy lyteraturu, 1960, 111 p.

12. Myronov V.A., Yankovskyy S.A. Spektroskopyya v orhanycheskoy khymyy, Moscow, Khymyya, 1985, 232 p.

13. Metodu yssledovanyy drevesynu y proyzvodnukh. pod red. N.H. Bazarynovoy, Barnaul, Yzd-vo Alt. Hos. Un-ta, 2002, 26 p.

Рецензія/Peer review : 17.09.2017 р. Надрукована/Printed :31.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 628.15

О.М. КВАРТЕНКО
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
Л.А. САБЛІЙ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
І.Б. ГРЮК
Рівненський державний гуманітарний університет

ВИЛУЧЕННЯ ФЕНОЛІВ ІЗ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД МЕТОДОМ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ

Проведено аналіз сучасного стану деструктивних методів видалення фенолів із природних вод. Досліджено процеси вилучення фенолів із використанням реагенту Фентона, гідродинамічної кавітації, обробкою пероксидом водню, активованим вугіллям. Визначено межі використання окремих схем деструкції фенолів залежно від їх концентрації та параметрів pH вихідної води.

Ключові слова: *гідродинамічна кавітація, гідроксильні радикали, очищення води.*

A.N. KVARTENKO
National University of Water and Environmental Engineering, Rivne city
L.A. SABLIY
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
I.B. GRUK
Rivne State Humanitarian University

REMOVAL OF PHENOLS FROM MULTI-COMPONENT UNDERGROUND WATERS BY METHOD OF HYDRODYNAMIC CAVITATION

The aim of this work is to study possibilities of using the method of hydrodynamic cavitation for destroying phenols in underground waters. As a result of carrying out the survey of present-day scientific researches and developments it was determined that under the use of the method of hydrodynamic cavitation there are created in water highly active OH radicals with the relatively oxidizing capability 2,05 which exceeds twice the relatively active capability of chlorine, by 1,56 times - of hydrogen peroxide and by 1,34 - of ozone. The kinetics was researched of phenols oxidation with concentrations 0,08-0,5 mg/cub. dm and 1,0 - 2,1 mg/cub. dm under different values of pH. As a result of carrying studies the possibility was determined of destroying phenols in a model solution on account of the emergence in the process of hydrodynamic cavitation of hydroxide radicals with their concentration up to 0,5 mg/cub. dm. It was established that under concentrations of phenols in a model solution from 0,5 to 1,5 mg/cub. dm the process of their destruction and oxidation may be conducted in two steps. At the first step - with the use of the hydrodynamic cavitation. At the second one - with the help of after-oxidation and sorption jointly of peroxide of hydrogen (with the concentration up to 100 mg/cub. dm) and 1 g/cub. dm of powder-like activated carbon with the 20 minutes contact period. The paper presents results of theoretical and experimental investigations concerning the use of the method of hydrodynamic cavitation for destroying phenols with the subsequent withdrawal of formed intermediates with the help of electrolyte solution beyond the boundary of reaction zone.

Key words: *hydrodynamic cavitation, hydroxyl radicals, water purification.*

Вступ

За даними [1] 24,2% підземних вод основного водоносного горизонту України можна віднести до умовно захищених,36,2% – до незахищених від антропогенних та природних забруднень. В окремих областях ці відсотки є значно вищими. Зокрема,в Волинській області вони складають, відповідно, 40,7 та 28,7%; Закарпатській – 1,8 та 91,2%; Житомирській – 9,8 та 67%; Рівненській – 81 та 15,6%. Проведені нами моніторингові дослідження параметрів якості підземних вод у 90 населених пунктах зазначених областей свідчать про наявність забруднень як природного (залізо, марганець, залізоорганічні сполуки, гумінові кислоти), так й антропогенного (феноли, амонійні сполуки, поверхнево активні речовини) походження. За даними наших досліджень із 20 водозаборів Рівненської та Волинської областей, придатних для господарсько-питного водопостачання без попереднього очищення, виявилися 29%, забрудненими (із концентраціями фенолів 0,0011 – 0,2 мг/дм^3) – 41,6%, дуже забрудненими (із концентраціями фенолів 0,21 – 0,5 мг/дм^3) – 29,4%. Більшість із вказаних забруднень не може бути видалена на діючих станціях знезалізнення і потребує застосування спеціальних методів водоочищення. Тому дослідження та впровадження нових технологій в цьому напрямку є досить актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень

Аналіз літературних даних дозволив зробити висновок щодо сучасних методів очищення води від фенолів, заснованих на окисних здатностях озону, пероксиду водню, перманганату калію, хлору. Застосування H_2O_2 дозволяє проводити окиснення великої кількості органічних забруднень. Цей підхід засновано на генерації гідроксильних радикалів $OH^{\cdot}$із H_2O_2 в присутності каталізатора – іонів заліза. Недоліком системи Фентона є доволі вузький оптимальний для реакції діапазон pH (від 2,0 до 4,0) та неможливість регенерації каталізатора. Гідроксильний радикал на відміну від інших окисників має найбільшу відносну окиснювальну здатність, причому на відміну від хлору та хлорнуватистої кислоти він не утворює токсичних продуктів у процесах хімічної реакції деструкції фенолів. Крім того, в порівнянні з $KMnO_4$, H_2O_2, O_3реакції деструкції можуть йти за значень pH вихідної води без додаткового підкислення, як у випадку з H_2O_2, або підлуження, як з O_3. Існує кілька методів, доступних для отримання $OH^{\cdot}$ радикалів,які можна поділити на фотохімічні та нефотохімічні. Фотохімічні методи: (O_3/УФ); (H_2O_2/УФ); (УФ – TO_2) [2, 3] є одночасно окислювальними і фотолітичними процесами. Відносний внесок кожного з елементів

залежить від багатьох факторів: інтенсивність і спектр ультрафіолетового опромінювання;співвідношення фаз окиснювачів, інтенсивності УФ; концентрації забруднень і їх природи; вмісту деяких компонентів природної води, які можуть виступати каталізаторами розкладу O_3 або частками $OH^{\cdot}$ радикалів. До не фотохімічних методів слід віднести: озонування в лужному середовищі (pH>8,5); озонування в присутності пероксиду водню (O_3/H_2O_2); використання реагенту ФентонаH_2O_2/Fe^{2+}/pH (3,0…5,0). Проте наведені методи є досить дорогими та складними в експлуатації в системах водопостачання малих населених пунктів. Тому для очищення природних підземних вод від складних органічних сполук необхідним є такий метод, який дозволяє генерувати гідроксильні радикали й одночасно є простим та недорогим в експлуатації.

Проведений огляд сучасних наукових досліджень та розробок дозволив зробити висновок, що при використанні методу гідродинамічної кавітації (ГДК) у воді утворюються $OH^{\bullet}$ радикали, необхідні для очищення від фенолів. Дослідженням методу ГДК присвячені наукові роботи Вітенько Т.М., Гумницького Я.М., Дубровської О.Г., Кулагіна В.А., Немчинного А.Ф., Промтова М.А., Федоткіна І.М., Шевчук Л.І. та ін. [4–9]. Сутність методу ГДК пов’язана з одночасною дією двох механізмів: розповсюдженням ударних хвиль поблизу колапсуючих кавітаційних мікропухирців та ударною дією кумулятивних мікроструменів при їх несиметричному колапсі. В результаті відбувається локальне підвищення температури та тиску поблизу пухирця з утворенням високоактивної області для проведення різних хімічних реакцій та процесів. Відомо, що при обробці рідин в умовах ГДК відбувається активація молекул води з утворенням активних мономерних молекул H_2O^* [4]. Одночасно з цим у фазі стиснення парогазових бульбашок відбувається генерування радикальних продуктів розкладу молекул води [5, 6]:

$$H_2O^* \rightarrow H^{\bullet} + OH^{\bullet} \quad (1)$$

$$H_2O^* \rightarrow H^{+} + OH^{\bullet} + \bar{e} \quad (2)$$

В роботі [6] за допомогою методу “спинових пасток” під час сонолізу води була доведена присутність радикалів $H^{\bullet}$ і $OH^{\bullet}$. За наявності у кавітаційній бульбашці кисню можливі реакції трансформації радикалів:

$$H^{\bullet} + O_2 \rightarrow HO_2^{\bullet} \quad (3)$$

Дослідження кавітаційної обробки води в атмосфері різних газів дозволило ряду авторів [7,9] виявити присутність хімічного фактору в процесі накопичення у воді молекулярного кисню,пов’язане із рекомбінацією створених радикалів:

$$HO_2^{\bullet} + OH^{\bullet} \rightarrow H_2O + O_2 \quad (4)$$

$$HO_2^{\bullet} + HO_2^{\bullet} \rightarrow H_2O_2 + O_2 \quad (5)$$

В роботах [4, 5] наведено механізми реакцій рекомбінації радикалів та зазначено, що остаточними продуктами у воді після проходження процесу ГДК можуть бути $H_2O \Rightarrow H_2O^*$, $H^{\bullet}$, $OH^{\bullet}$, H^+, OH^-, H_2, H_2O_2. Підкреслено можливість реакції між радикальними продуктами $H^{\bullet}$та молекулами пероксиду водню:

$$H^{\bullet} + H_2O_2 \rightarrow H_2O + OH^{\bullet} \quad (6)$$

Таким чином, в результаті процесу ГДК здатний утворювати високоактивні радикали $OH^{\bullet}$із відносною окислювальною здатністю 2,05, яка перевищує в два рази відносну активну здатність хлору, в 1,56 рази – пероксиду водню та у 1,34 рази –озону.

Метою даної роботи є визначення можливості використання методу ГДК для деструкції фенолів у підземних водах.

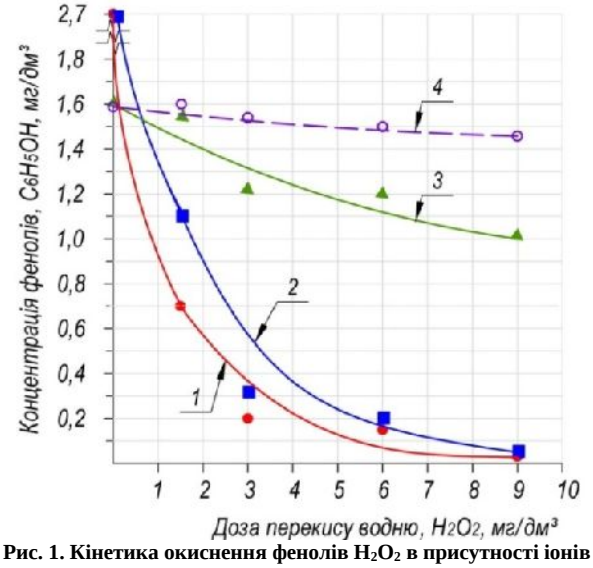


Рис. 1. Кінетика окиснення фенолів H_2O_2 в присутності іонів заліза (II) залежно від pH модельного розчину: 1 –pH=5,0; 2 – pH=5,5; 3 – pH= 6,0; 4 –pH=6,5

Основні дослідження

Дослідження проводилися в декілька етапів. На першому етапі нами було досліджено кінетику окиснення фенолів в залежності від pH модельного розчину та доз пероксиду водню в присутності іонів заліза(II) (15 мг/дм^3). Модельні розчини об’ємом 1 дм^3 готували на основі водопровідної води із внесенням фенолу (2,7 мг/дм^3 та 1,6 мг/дм^3) та коригуванням pH, відповідно до 5,0; 5,5; 6,0; 6,5. Далі з кожного об’єму із відповідними pH та концентраціями фенолів відбирали по чотири проби об’ємами по 100 мл, додавали розрахункову концентрацію сульфату заліза (II) та пероксиду водню. Після перемішування впродовж 30 хв додавали розчин коагулянту оксихлориду алюмінію (20 мг/дм^3) та фільтрували через паперовий фільтр «синя стрічка»,визначаючи концентрацію фенолів у фільтраті. Результати досліджень представлено на рис 1. Найбільш ефективними виявилися процеси окиснення

фенолів при pH 5,0 та pH 5,5 (рис. 1, криві 1, 2).

У цих випадках пероксид водню функціонує як окисник і процес частково відбувається за реакцією Фентона, коли на кожний окиснений пероксидом водню іон Fe^{2+}утворюється додатковий радикал $OH^{\cdot}$, який в подальшому приймає участь в окисненні фенолу. В результаті необхідна кількість пероксиду водню в зоні реакції в присутності іонів Fe^{2+}зменшується в 1,5 рази і становить 10 мг/дм^3, замість очікуваних 16,2 мг/дм^3, необхідних для повного видалення присутніх у воді фенолів. У біля нейтральних водах іони Fe^{2+} окислюються киснем повітря до Fe^{3+}, який не є каталізатором процесу, а пероксид водню може проявляти як окисні, так і відновні властивості, що значно гальмує швидкість окиснення.

На другому етапі дослідження проводилися на напіввиробничій установці (рис. 2). Метою дослідження було вивчення умов деструкції фенолів за методом ГДК – коагуляція – фільтрування. До складу установки входили: ємність з модельним розчином об'ємом 900 дм^3, насос 3 (продуктивністю 4,3 – 6,7 м^3/год та напором 2,2 ат), електродвигун 4, гідродинамічний кавітатор 5, манометри 6, контактна камера 7 діаметром 100 мм та об'ємом 12 дм^3, запірно-регулююча арматура 8.

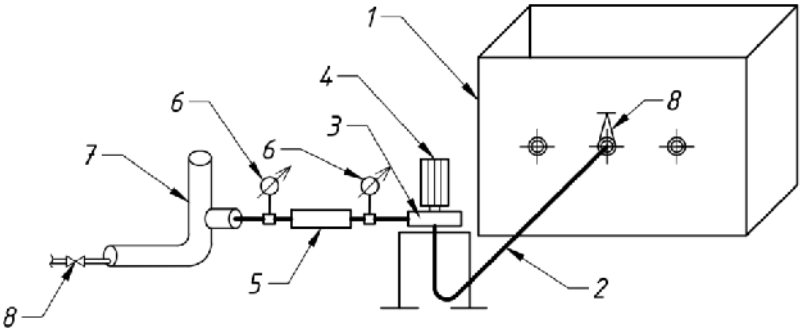


Рис. 2. Схема експериментальної установки з гідродинамічним кавітатором: 1 – ємність з модельним розчином; 2 – всмоктуючий патрубок насоса; 3 – насос; 4 – електродвигун; 5 – гідродинамічний кавітатор; 6 – манометри; 7 – контактна камера; 8 – запірно-регулююча арматура

Модельний розчин готували на водопровідній воді з концентраціями фенолів 0,08; 0,3; 0,5; 1,0; 1,4; 1,6; 2,1 мг/дм^3 та різними величинами показника pH. Кавітаційний пристрій було обладнано знімними соплами діаметрами 5,3; 6,4; 8,4 мм та насадками різних типів. В процесі проведення досліджень вивчали режими роботи ГДК з точки зору ефективності деструкції складних органічних комплексів при зміні геометрії течії. Установка працювала наступним чином:модельний розчин із певними значеннями pH та концентрацією розчинних фенолів із ємності 1 по всмоктувальному патрубку 2 насоса 3 подавався до гідродинамічного кавітатора 5. Оброблена вода надходила до контактної камери 7, де відбувався контакт деструктурізованих органічних сполук із реакційно здатними радикалами атомарного кисню $O^{\cdot}$, гідроксильними радикалами $OH^{\cdot}$,молекулярним киснем O_2, які ініціювали перебіг всіх подальших радикальних реакцій за участю фенолів та їх похідних. Через певні періоди часу (5, 30, 60, 90, 120 хв) проводили відбір проб із контактної колони. Проби обробляли розчином оксихлориду алюмінію дозою 20 мг/дм^3 та нейоногенним флокулянтом. Після утворення пластівців проводили фільтрування обробленого модельного розчину через паперовий фільтр «синя стрічка» із подальшим визначенням концентрації фенолів у фільтраті.

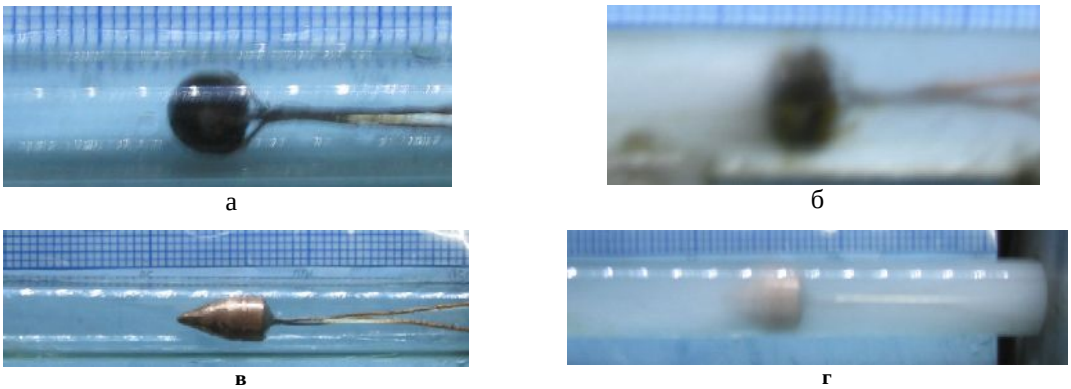


Рис. 3. Виникнення кавітаційного потоку в камері змішування при різних типах насадок: а, б) металева куля; в, г) конусна насадка

На рис. 3 наведено результати візуальних досліджень виникнення кавітаційного потоку рідини в камері змішування кавітатора при різних типах насадок.

На рис.4 наведено результати досліджень деструкції фенолів в кавітаційному потоці при концентраціях 0,08 та 0,5 мг/дм^3 при pH розчину 6,4 – 6,5. Діаметр сопла становив 5,3 мм, в якості насадки використовували металеву кулю діаметром 14,5 мм (рис. 3 а-б).

На рис. 5 наведено результати досліджень деструкції фенолів при концентрації у модельному розчині від 1,0 до 2,1 мг/дм^3 та різних значеннях pH. При концентраціях фенолів у розчині 2,0 мг/дм^3 та величині pH 6,3 деструкція та видалення фенолів лише за допомогою ГДК складали 48–55% (рис. 5, графік 1). Максимальну деструкцію спостерігали одразу на виході із ГДК та в перші хвилини контакту $OH^{\cdot}$ радикалів із розчином. При збільшенні терміну контакту до 60 хв в обробленому розчині спостерігали

підвищення концентрації фенолів (рис. 5, графік 1), що свідчить про проходження реакції у зворотному напрямку, недостатню окисну потужність системи та необхідність своєчасного виведення окиснених сполук за межі зони реакції із залученням процесу коагуляції. При використанні трьох рециклів концентрація залишкового фенолу у розчині становила 0,003 – 0,001 мг/дм^3. Однак використання такого методу для станцій водоочищення не є економічним, і тому необхідно було розглянути інші можливості підвищення окисної потужності системи.

При використанні сопла d=5,3 мм та конусної латунної насадки (рис. 3, в, г) ефективність окиснення фенолів досягала 70% на виході з ГДК. Проте при тривалому контакті без обробки розчином коагулянту, як у попередньому випадку, спостерігали процес відновлення фенолів у розчині (крива 2). Однак при використанні такої конфігурації сопла та насадки можливим є окиснення до 1,0 мг/дм^3 розчинних фенолів в умовах «жорсткої»кавітації. Проведені дослідження щодо вивчення окисної спроможності системи при введенні до зони кавітації кисню із атмосфери повітря зменшували ефективність деструкції фенолів на 15 – 25 % (крива 3). У цьому випадку спостерігали явище демпфуючого впливу вільних газових включень на ефективність кавітаційно-кумулятивного процесу [7]. При цьому рідину, яка оточує кавітаційну бульбашку, вже не можна вважати такою, що не підлягає стисканню [8]. Згідно з [7], при вмісті вільного газу в рідині φ>10 – 20% швидкість звуку різко знижується, тому при достатньо малих швидкостях руху границі пухирців кумулятивні ефекти практично відсутні, оскільки вся його енергія знижується до енергії акустичного випромінювання та швидко гаситься у середовищі, яке стискається.

Ґрунтуючись на результатах теоретичних та експериментальних досліджень [4, 5] щодо утворення $OH^{\cdot}$ радикалів в результаті взаємодії $H^{\cdot}$ радикалів із пероксидом водню (реакція 6), нами було запропоновано введення в зону кавітації 3% розчину пероксиду водню концентрацією 30 мг/дм^3. Створене таким чином додаткове джерело $OH^{\cdot}$ радикалів дозволило підвищити ефективність деструкції фенолів при початковій їх концентрації 1,4 мг/дм^3 та величинах pH 7,0 – 7,2 до 80%. Для досягнення необхідного ступеня очищення нами було проведено дослідження по доокисненню залишкових концентрацій фенолів за допомогою суміші пероксиду водню концентрацією 80 – 100 мг/дм^3 та 1 г/дм^3 активованого вугілля з наступним 20-хвилинним контактом (крива 4).

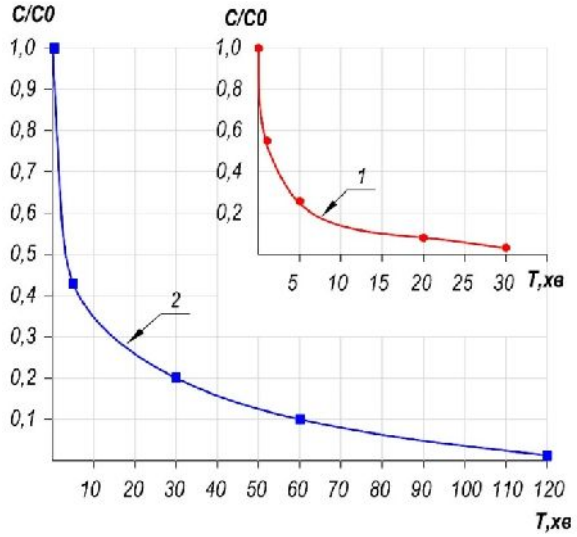


Рис. 4. Кінетика деструкції фенолів залежно від їх концентрації: 1 – 0,08 мг/дм^3; 2 –0,5 мг/дм^3

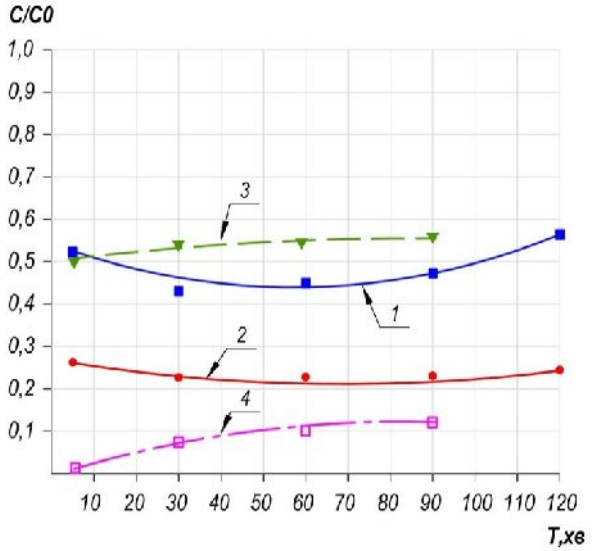


Рис. 5. Кінетика деструкції фенолів залежно від їх концентрації в різних умовах проведення процесу кавітації: 1 – 2,1 мг/дм^3, pH 6,3; 2 – 1,55 мг/дм^3, pH 6,5; 3 – 1,2 мг/дм^{3}pH 6,4; 4 – 0,6мг/дм^3, pH 6,4

У результаті поєднання цих інгредієнтів спостерігали інтенсивне виділення активного кисню, який проводив процес доокиснення фенолів із їх одночасною сорбцією на поверхні активованого вугілля. Ефективність видалення фенолів на другому ступені складала 0,5–0,6 мг/дм^3. Результати експериментальних досліджень, графіки фільтроциклів яких планується навести у наступних публікаціях, було підтверджено у виробничих умовах на станції водоочищення в с. Балашівка Рівненської області.

Теоретичне обґрунтування процесу

На основі відомого вільно-радикального механізму утворення $OH^{\cdot}$ радикалів в кавітаційному потоці [4–7] нами розроблено механізм деструкції фенолів із наступним виведенням утворених інтермедіатів за допомогою розчину електроліту за межі зони реакції.

На початку процесу в ГДК реакція перебігає за вільно-радикальним механізмоміз створенням на першій стадії гідроксильних радикалів $OH^{\bullet}$, які, в свою чергу, породжують розгалужену ланцюгову реакцію:

$$H_2O = H^{\bullet} + OH^{\bullet} \quad (7)$$

$$OH^{\bullet} + OH^{\bullet} = H_2O + O^{\bullet\bullet} \quad (8)$$

В якості проміжних продуктів може утворюватися H_2O_2:

$$OH^{\bullet} + O^{\bullet\bullet} = HO^{\bullet} + O^{\bullet} \quad (9)$$

$$OH^{\bullet} + OH^{\bullet} = H_2O_2 \quad (10)$$

$$HO_2^{\bullet} + H^{\bullet} = H_2O_2 \quad (11)$$

У середині бульбашок під дією кавітаційного тиску Р та температури Т=10000К, H_2O_2 дисоціює за радикальним механізмом:

$$H_2O_2 \leftrightarrow 2OH^{\bullet} \quad (12)$$

$$H_2O_2 \leftrightarrow H_2O + O^{\bullet} \quad (13)$$

$$2O^{\bullet} \rightarrow O_2 \quad (14)$$

Феноли у воді дисоціюють як кислоти:

$$C_6H_5OH \leftrightarrow C_6H_5O^{-} + H^{+} \quad (15)$$

У кавітаторі відбуваються радикальні реакції:

$$C_6H_5O^{-} - 1\bar{e} \leftrightarrow C_6H_5O^{\bullet} \quad (16)$$

$$H^{+} + 1\bar{e} \leftrightarrow H^{\bullet} \quad (17)$$

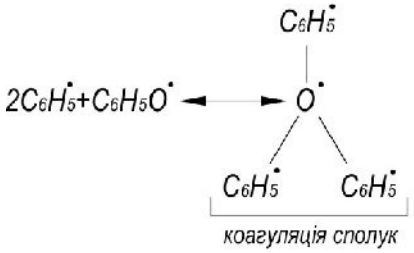
$$C_6H_5OH \xrightarrow{10000K} {}^{\bullet}C_6H_5 + {}^{\bullet}OH \quad (18)$$

Рекомбінація:

$$2H^{\bullet} \rightarrow H_2 \uparrow \quad (19)$$

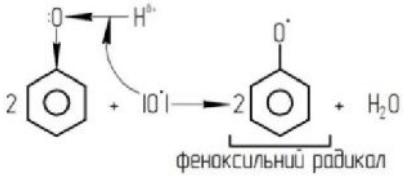
$$2C_6H_5O^{\bullet} + 2H^{\bullet} \rightarrow C_6H_5 - O - C_6H_5 + H_2O \quad (20)$$

$$2C_6H_5^{\bullet} \rightarrow C_6H_5 - C_6H_5 \quad (21)$$



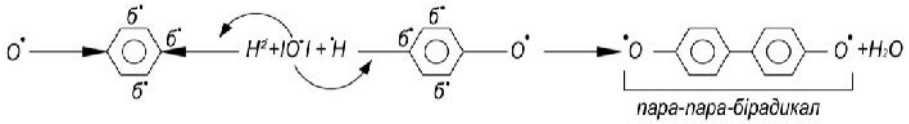
(22)

Відомо, що під дією одно електронних окисників, таких як радикал атомарного кисню $O^{\cdot}$, що утворюється за реакцією (12, 13), феноли легко окиснюються в похідні дигідроксидифенолу або до гідроксидифенілового ефіру. Спочатку утворюються феноксильні радикали $C_6H_5O^{\cdot}$:



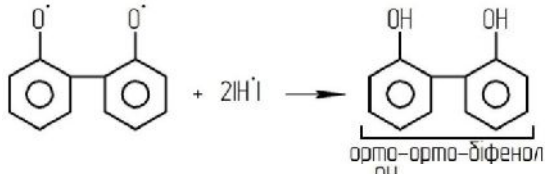
(23)

В подальшому феноксильні радикали піддаються димеризації в результаті утворення нових зв'язків $C-C$ між орто-орто; орто-пара та пара-пара положенням вихідних радикалів за рівняннями:

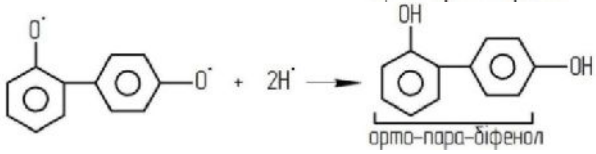


(24)

В умовах гідродинамічної кавітації в кислому або слабокислому середовищі при pH=5,5 – 6,0 (при надлишку $H^{\cdot}$) аналогічно створюються орто-пара та орто-ортобіфеноли:



(25)



(26)

Також можливе утворення нових $C-O$ зв'язків між атомом кисню одного радикалу та атомом вуглецю в орто-положенні іншої радикальної частинки:

(27)

Отже, існує можливість утворення п'яти різних типів димерів, які знаходяться в рівновазі з вихідними феноксильними радикалами. В подальшому наведені вище димери піддаються ізомеризації у похідні дигідроксидифенілу, або гідроксидифенілового ефіру, наявність яких у досліджуваному розчині підвищує ефективність вилучення фенолів шляхом подальшої коагуляції з використанням оксихлориду алюмінію в якості коагулянта.

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено можливість деструкції фенолів у модельному розчині за рахунок виникнення в процесі ГДК гідроксильних радикалів. При концентраціях фенолів від 0,5 до 1,5 мг/дм^3 для посилення окисної здатності системи рекомендовано введення в кавітаційний потік розчину пероксиду водню.

Література

1. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2003 році / М. М. Гіроль, С. Б. Проценко, В. С. Кравченко та ін. ; під заг. ред. М. М. Гіроля. – Рівне : ВАТ Рівненська друкарня, 2005. – 143 с.
2. Гончарук В.В. Фотокаталитическое деструктивное окисление органических соединений в водных средах / В.В. Гончарук // Химия в интересах устойчивого развития. – 1997. – № 5. – С. 345–355.
3. Dowideit P., Fang X. The fate of peroxil radicals in aqueous solution II // Wat. Sci. Tech. –1997. – Vol. 35, № 4. – P. 9–15.
4. Механізм та кінетичні закономірності інтенсифікуючої дії гідродинамічної кавітації у хіміко-технологічних процесах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Вітенько Тетяна Миколаївна ; Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. – Т., 2010. – 436 арк.
5. Витенько Т.Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т.Н. Витенько, Я.М. Гумницкий // Химия и технология воды. – К., 2007. – № 5. – С. 231–237.
6. Маргулис М.А. Основы звукохимии / М.А. Маргулис. – М. : Химия, 1984. – 272 с.
7. Дубровская О.Г. Технология гидротермодинамической обработки природных и сточных вод с использованием эффектов кавитации : дис. ... кандидата технических наук : 01.04.14, 05.23.04 / Дубровская Ольга Геннадьевна / Сиб. федер. ун-т. – Красноярск, 2007. – 134 с. : ил.
8. Айвени Р. Численный анализ явления схлопывания кавитационного пузырька в вязкой сжимаемой жидкости / Р. Айвени, Ф. Хэммит // Теоретические основы инженерных расчетов. Сер. Д. М. – 1965. – Т. 87. № 4. – С. 140–150.
9. Шевчук Л. І. Очищення води від органічних та біологічних забруднень в умовах кавітації : дис. … д-ра техн. Наук : 05.17.21, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т" / Шевчук Лілія Іванівна. – Київ, 2015. – 400 с.

References

1. Nacional'na dopovid' pro jakist' pitnoї vodi ta stan pitnogo vodopostachannja v Ukraїni u 2003 roci / M. M. Girol', S. B. Procenko, V. S. Kravchenko ta in. ; pid zag. red. M. M. Girolja. – Rivne : VAT Rivnens'ka drukarnja, 2005. – 143 s.
2. Goncharuk B.B. Fotokataliticheskoe destruktivnoe okislenie organicheskih soedinenij v vodnyh sredah / B.B. Goncharuk // Himija v interesah ustojchivogo razvitija. – 1997. – № 5. – S. 345–355.
3. Dowideit P., Fang X. The fate of peroxil radicals in aqueous solution II // Wat. Sci. Tech. –1997. – Vol. 35, № 4. – P. 9–15.
4. Mehanizm ta kinetichni zakonomirnosti intensifikujuchoї diї gidrodinamichnoї kavitacії u himiko-tehnologichnih procesah : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.17.08 / Viten'ko Tetjana Mikolaїvna ; Ternop. nac. tehn. un-t im. I. Puljuja. – T., 2010. – 436 ark.
5. Viten'ko T.N. Mehanizm aktivirujushhego dejstvija gidrodinamicheskoj kavitacii na vodu / T.N. Viten'ko, Ja.M. Gumnickij // Himija i tehnologija vody. – K., 2007. – № 5. – S. 231–237.
6. Margulis M.A. Osnovy zvukohimii / M.A. Margulis. – M. : Himija, 1984. – 272 s.
7. Dubrovskaja O.G. Tehnologija gidrotermodinamicheskoj obrabotki prirodnyh i stochnyh vod s ispol'zovaniem jeffektov kavitacii : dis. ... kandidata tehnicheskih nauk : 01.04.14, 05.23.04 / Dubrovskaja Ol'ga Gennad'evna / Sib. feder. un-t. – Krasnojarsk, 2007. – 134 s. : il.
8. Ajveni R. Chislennyj analiz javlenija shlopyvanija kavitacionnogo puzyr'ka v vjazkoj szhimaemoj zhidkosti / R. Ajveni, F. Hjemmit // Teoreticheskie osnovy in¬zhenernyh raschetov. Ser. D. M. – 1965. – T. 87. № 4. – S. 140–150.
9. Shevchuk L. I. Ochishhennja vodi vid organichnih ta biologichnih zabrudnen' v umovah kavitacії : dis. … d-ra tehn. Nauk : 05.17.21, Nac. tehn. un-t Ukraїni "Kiїv. politehn. in-t" / Shevchuk Lilija Ivanivna. – Kiїv, 2015. – 400 s.

Рецензія/Peer review : 13.10.2017 р. Надрукована/Printed :24.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Н.Б. Голуб

УДК 602.44

Л.А. САБЛІЙ, М.С. КОРЕНЧУК
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»
С.В. КОНОНЦЕВ, Ю.Р. ГРОХОВСЬКА
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ ІНТЕГРОВАНОЇ МУЛЬТИТРОФІЧНОЇ АКВАКУЛЬТУРИ У РИБНИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ ІЗ ЗАМКНУТИМ ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ

Метою досліджень є розробка технології водоочищення із залученням груп кормових організмів, які здатні використовувати характерні забруднення УЗВ для культивування прісноводних риб в якості поживного субстрату. У результаті аналізу очисного потенціалу окремих гідробіонтів було виявлено групи, найбільш перспективні до культивування у інтегрованій з УЗВ аквасистемі. Залучення до процесів відновлення якості циркуляційної води УЗВ організмів різних трофічних рівнів дозволить максимально повно використати енергетичний потенціал кормів та знизити кількості утворених відходів. Обґрунтовано доцільність реалізації концепції системи інтегрованої мультитрофічної аквакультури для очищення циркуляційної води прісноводних рибницьких комплексів із замкнутим водозабезпеченням. Визначено групи кормових організмів, які володіють високим потенціалом щодо вилучення та трансформації основних забруднень УЗВ, та можуть ефективно культивуватись в очисних установках.

Ключові слова: *інтегрована мультитрофічна аквакультура, очищення води УЗВ.*

L.A. SABLIY, M.S. KORENCHUK
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
S.V. KONONTCEV, Y.R. GROKHOVSKA
National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

IMPLEMENTATION OF THE CONCEPT OF INTEGRATED MULTI - TROPHIC AQUACULTURE IN RECIRCULATING SYSTEMS FOR FISH CULTIVATION

The aim of research is development of water treatment technology that is using groups of feed organisms, which are able to use typical pollution of a recirculating aquaculture systems (RAS) for freshwater fishes cultivation as a trophic substrate. Aquatic organisms for cultivation together with fishes were selected by analysis of the self-purification processes of natural water, biochemical and metabolic features of certain species. Also, have been used results of our previous experimental studies on the cultivation of feed organisms in sewage treatment plants in the RAS. By analysis of a purification potential of specific aquatic organisms were found most promising groups for cultivation in systems which integrated with the RAS. Involving organisms from different trophic levels to RAS water treatment processes allows maximum use an energy potential of feed and reduce amount of waste. It was grounded the expediency of implementation Integrated multi-trophic aquaculture systems (IMTA) for the RAS water treatment processes. We identified groups of food organisms that have high ability to remove and transformation of main pollutants in RAS, which could be cultivated in purification plants. Our results can be used in construction for water treatment in the RAS. The implementation of the biotechnology would significantly reduce operating costs for the sediment removal and save food due to growing their own live food in aquaculture systems.

Keywords*: integrated multi-trophic aquaculture, RAS water treatment.*

Вступ. Концепція системи інтегрованої мультитрофічної аквакультури (Integrated multi - trophic aquaculture systems – IMTA) вважається найбільш прогресивним напрямком розвитку рибництва. Фактично, дана концепція дає відповідь на складне питання найближчого майбутнього людства – як забезпечити стійке зростання продукції аквакультури та одночасно зменшити надходження відходів виробництва у навколишнє середовище. Основною метою IMTA є підвищення продуктивності водних ресурсів, зниження рівня забруднення навколишнього середовища шляхом використання побічних продуктів (відходів) для забезпечення харчування організмів інших трофічних рівнів [1]. Досвід передових країн Європи, Америки та Азії, що вже декілька десятиліть активно впроваджують методи ведення рибництва в установках із замкнутим водозабезпеченням, дозволяє чітко окреслити основні перспективи розвитку даної галузі. Більшість існуючих інтегрованих мультитрофічних аквасистем розроблено на базі морських господарств, що пов’язано з високою харчовою цінністю субпродукції, яка вирощується у марикультурі (водорості, голкошкірі, кишковопорожнинні, молюски), відсутністю ефективних шляхів видалення утворених метаболітів риб з акваторії, а також жорсткими екологічними вимогами до діяльності таких господарств [2,3]. Системи аквапоніки, інтегровані з прісноводними УЗВ, являють собою лише перший крок до створення комплексної мультитрофічної аквакультури у даному сегменті індустріального рибництва [4], але навіть він дозволив суттєво підвищити ефективність відновлення якості води порівняно із класичними технологіями, які використовували в УЗВ з середини XX століття.

Постановка завдання. В межах даної роботи вирішували завдання щодо розробки інтегрованої з прісноводним рибницьким господарством індустріального типу аквасистеми, яка б забезпечила відновлення забрудненої у басейнах води з одночасними культивуванням гідробіонтів різних трофічних рівнів. Дана система характеризується потенційною спроможністю до зниження витрати на вирощування промислово цінних риб в УЗВ, створення конкурентоспроможної продукції та досягнення практично безвідходного виробництва. Усунення основних проблемних аспектів при експлуатації УЗВ, пов’язаних з витратами на відновлення якості води та потребою в утилізації утворених внаслідок очищення осадів, дозволить суттєво

зменшити потребу у комбікормах, знизити негативний вплив на навколишнє середовище та отримати додаткову харчову або кормову субпродукцію.

Результати дослідження. Мультитрофічна аквасистема, інтегрована з УЗВ, має на меті забезпечення максимально повного використання енергетичного потенціалу кормів та зниження кількості відходів, що утворюються у процесі вирощування риби. Вирішення даного завдання можливе лише за умови ефективної трансформації метаболітів риб та залишків кормів у біомасу гідробіонтів – очисних агентів. Тому метою наших досліджень була розробка технології водоочищення із залученням груп кормових організмів, які здатні використовувати характерні забруднення УЗВ як поживний субстрат.

При розв'язанні задачі щодо максимально ефективного використання енергетичного потенціалу кормів та підвищення економічного ефекту інтегрованої аквасистеми необхідно забезпечити культивування в якості очисних агентів саме тих гідробіонтів, які окрім потенціалу щодо трансформації характерних забруднень становлять ще й кормову цінність для риб. Таким чином, при створенні мультитрофічної системи необхідно зважати на три основні критерії: швидкі темпи метаболізму та пристосованість до умов забрудненої води УЗВ; можливість ефективного утримання і розмноження гідробіонтів у проточних біореакторах; висока кормова цінність. Оскільки основним виробничим процесом у будь-якому випадку залишається вирощування риби, першочерговим завданням інтегрованої з УЗВ системи буде ефективне вилучення та трансформація основних забруднень циркуляційної води. Водночас, важливим залишиться й питання щодо зростання біомаси та відходів, що утворюються в результаті відновлення якості води. Очевидно, що чим більшу матеріальну цінність матиме субпродукція, вирощена в умовах інтегрованих культиваторів і чим меншою буде кількість відходів, що потребують витрат на утилізацію, тим більшою економічною ефективністю та екологічною чистотою буде характеризуватись аквасистема.

Детальний аналіз потенційного навантаження на споруди біологічного очищення УЗВ у процесі годівлі риб [5–7] дозволяє визначити основні групи забруднень, що відрізняються за фазово-дисперсним станом та складом. В цілому, якісний склад кормів визначає характер нерозчинених забруднень води УЗВ, основну частину з них складають сполуки Нітрогену та Фосфору. Також у твердій фазі присутні неперетравлені домішки корму, пилоподібні частки, які недоступні для споживання рибам. У розчиненій формі у воду надходять метаболіти риб, що виділяються через поверхню шкіри та зябра. Відповідно до біохімічних розрахунків [8], на кожний кілограм спожитого корму риба виділить у воду біля 10 г нерозчинених забруднень та близько 40 г метаболітів у розчиненій формі. Частина буде розсіяна на обмінні процеси, забезпечення життєдіяльності, а 90–91% перейде безпосередньо у приріст маси.

Результатами багатьох досліджень та практикою окремих господарств було підтверджено, що розчинені сполуки Нітрогену, а саме – йони амонію, нітрати та нітрити серед інших гідробіонтів найбільш ефективно вилучають рослини [9–12]. Процес асиміляції рослинами Нітрогену відбувається з порівняно великою швидкістю, без проміжних етапів та без утворення побічних продуктів. Водночас, практика експлуатації біофільтрів, що виконують роль нітрифікаторів, та споруд з денітрифікації засвідчує низькі темпи трансформації сполук Нітрогену бактеріями, нестабільність протікання процесу, високу чутливість до параметрів води та співвідношення у ній окремих компонентів. Також при використанні біофільтрів проблемним залишається вилучення із води фосфатів. За окремими даними, фосфати можуть бути вилучені під час процесу денітрифікації [13], але й у такому випадку проблемні аспекти протікання денітрифікації в УЗВ не вирішуються. Відкритими залишаються й питання, у які сполуки трансформуються розчинені фосфати та які подальші шляхи їх утилізації. Залучення ж до процесів очищення циркуляційної води рослин забезпечує швидку асиміляцію розчиненого Фосфору з високим ефектом очищення. Таким чином, найбільш ефективним способом вилучення та трансформації розчинених сполук Нітрогену та Фосфору є використання в якості очисних агентів рослин. Враховуючи відсутність побічних продуктів, що утворюються при культивуванні рослин, та високі ефекти вилучення з води фосфатів, нітритів, нітратів та амонійного Нітрогену (від 86 до 99%), дані забруднення можна вилучити в межах однієї споруди біологічного очищення – фітореактора.

Нерозчинені домішки, що надходять у воду рибницьких басейнів, можуть розглядатись як субстрат для багатьох груп гідробіонтів – детритофагів. Їх основною задачею в аспекті відновлення якості води УЗВ може бути підвищення рівня мінералізації затриманих часток, укрупнення та зменшення їх загальної кількості. З огляду на те, що нерозчинені забруднення УЗВ здатні швидко розкладатись у воді, підвищуючи концентрацію амонію, фосфатів та значення БСК, більш доцільним є відокремлення затриманих у спорудах механічного очищення крупних домішок із подальшим очищенням та розділенням фаз. Водночас, практика експлуатації барабанних фільтрів, що працюють за принципом проціджування, та інших конструкцій споруд для фільтрації засвідчує вкрай низьку ефективність роботи таких споруд при використанні сіток з розмірами вічка менше 40 мкм. Тому раціональним рішенням у даному випадку є використання сіток з розмірами вічка 60–100 мкм, які забезпечують достатньо стабільну та надійну роботу споруд механічного очищення. Крупнодисперсні забруднення, видалені із загального потоку води у спорудах механічного очищення, потребують обробки за межами УЗВ на відкритих територіях. Після мінералізації та зневоднення вони можуть ефективно використовуватись як добрива у сільському господарстві. Дрібні домішки, які не затримуються у проціджувачі, більш ефективно можна вилучити у спорудах біологічного очищення.

Трансформація дрібних нерозчинених домішок може відбуватись у спеціально розроблених біореакторах, конструктивні особливості яких дозволять культивувати визначені групи гідробіонтів.

Забезпечити утилізацію твердих відходів можна за допомогою організмів нижчих трофічних рівнів, які не можуть розглядатись в якості харчових об'єктів для людини, але є чудовим кормом для риб. Особливі перспективи така схема відкриває для господарств, де вирощують види риб, здатних споживати саме такі організми. Це можуть бути представники тропічних черевоногих молюсків, водних олігохет та креветок, що характеризуються порівняно швидкими темпами росту, пристосованістю до умов тепловодних господарств УЗВ, високою кормовою цінністю для риб. Доцільність вирощування в очисному комплексі всіх трьох груп обґрунтована їх відмінностями у метаболізмі, отже і роль кожної групи у процесах трансформації органічної речовини буде відрізнятись. Окрім того, побічні продукти (метаболіти), що будуть утворюватись у культиваторах при вирощуванні одної групи, можуть бути використані як поживний субстрат, що з потоком води надійде у культиватор для наступної групи. Оскільки зазначені гідробіонти у процесі життєдіяльності виділяють у воду також і розчинені метаболіти (переважно сполуки Нітрогену та Фосфору), необхідно забезпечити їх вилучення у фітореакторі. Таким чином трансформація нерозчинених органічних сполук може відбуватись у два-три послідовні етапи, зображені на схемі (рис. 1), після кожного з них буде спостерігатись підвищення ступеня мінералізації твердої речовини, що фактично виступає забрудненням УЗВ, та зниженням її об'єму. Пропорційно буде збільшуватись і біомаса очисних агентів, що включені у процеси трансформації нерозчинених домішок.

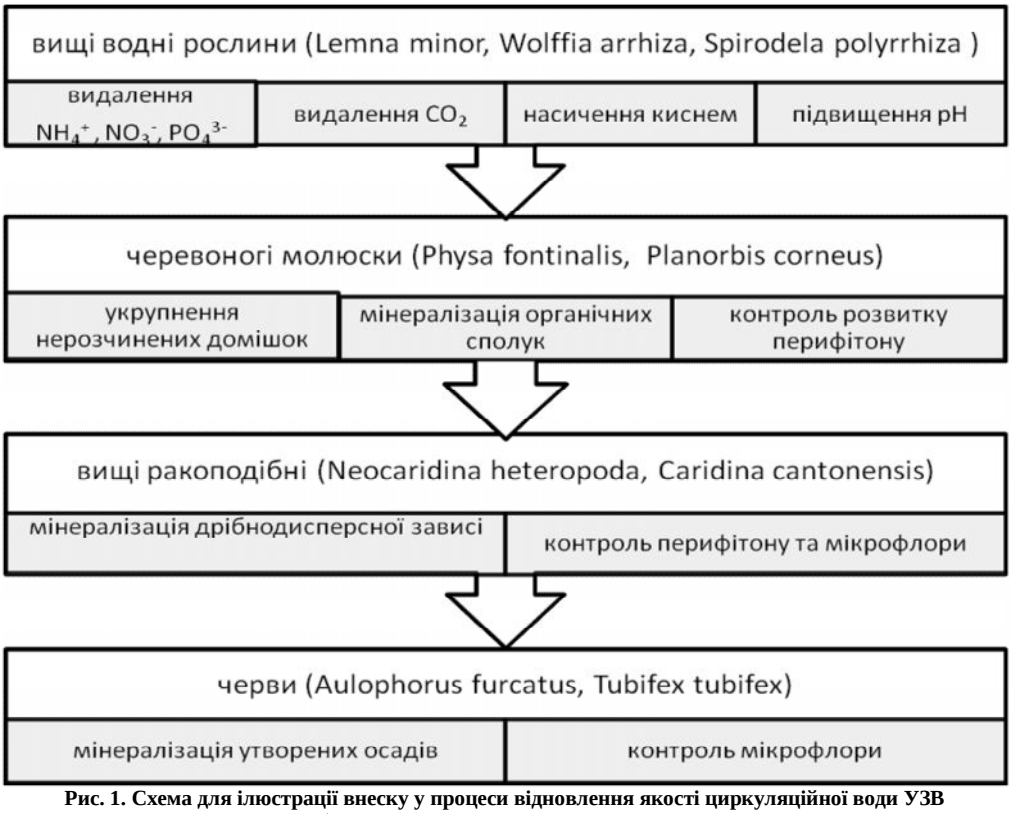


Рис. 1. Схема для ілюстрації внеску у процеси відновлення якості циркуляційної води УЗВ окремих груп гідробіонтів, які можуть культивуватись в очисних установках

Окрім визначених груп гідробіонтів, які будуть цілеспрямовано культивуватись у біореакторах, в очисних спорудах можна очікувати спонтанний розвиток організмів нижчого рівня організації – бактерій, грибів, водоростей, найпростіших та ін. У разі пристосованості конструкцій культиваторів для певної групи очисних агентів, інтенсивний та неконтрольований розвиток мікрофлори буде неможливим. По-перше, її чисельність буде контролюватись молюсками, червами та ракоподібними. Також конструктивні особливості біореакторів і гідравлічний режим споруд забезпечують постійне вимивання планктонних організмів. Окрім того, наявність у спорудах певної кількості прикріпленої мікрофлори призведе лише до підвищення ефективності очищення води, адже у процесах природного самоочищення водойм перифітон також відіграє важливу роль. У разі, якщо зазначені групи гідробіонтів будуть здатні в сукупності вилучити з води основну масу забруднень, водний потік такої інтегрованої системи можна замкнути.

Висновки. Реалізація концепції системи інтегрованої мультитрофічної аквакультури при вирощуванні риб в УЗВ дозволяє підвищити економічну ефективність діяльності таких господарств і забезпечити екологічну чистоту виробництва. Вирощування в якості субкультури окремих груп кормових організмів, які у процесі життєдіяльності забезпечують вилучення із забрудненої води нерозчинених і розчинених метаболітів риб, дозволяє зменшити загальну потребу у комбікормах, знизити кількості утворених відходів.

References

1. Ariel E. Turcios, Jutta Papenbrock. Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents — What Can We Learn from the Past for the Future? // Sustainability. – 2014. – 6. – pp. 836–856.

2. Neori A., Ragg N.L.C., Shpigel M. The integrated culture of seaweed, abalone, fish and clams in modular intensive land-based systems: Performance and nitrogen partitioning within an abalone (Haliotis tuberculata) and macroalgae culture system // Aquacult. Eng. – 1998. – 15. – pp. 215–239.

3. Waller U., Buhmann A.K., Ernst A. et al. / Integrated multi-trophic aquaculture in a zero-exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production // Aquaculture International. – 2015. – Volume 23. – Issue 6. – pp. 1473–1489.

4. Marton E. / Polycultures of fishes in aquaponics and recirculating aquaculture // Aquaponics J. – 2008. – 48. – pp. 28–33.

5. Kelly L.A., Bergheim A., Hennessy M.M. / Predicting output of ammonium from fish farms // Water Res. – 1994. – 28. – p 1403–1405.

6. Heinen J.M., Hankins J.A., Adler P.R. / Water quality and waste production in a recirculating trout-culture system with feeding of a higher-energy or a lower-energy diet // Aquacult. Res. – 1996. – 27. – pp 699–710.

7. Schneider O, Sereti V, Eding EH, Verreth JAJ / Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems // Aquac Eng. – 2005. – 32. – p. 379–401.

8. Брайнбалле Я. Руководство по аквакультуре в установках замкнутого водоснабжения / Якоб Брайнбалле / Eurofish – international organization. – Копенгаген, 2010. – 70 с.

9. Zachritz W.H., Jacquez R.B. / Treating intensive aquaculture recycled water with a constructed wetlands filter system // Constructed Wetlands for Water Quality Improvement; Moshiri, G.A., Ed.; Lewis Publishers: Boca Raton, USA. – 1993. – pp. 609–613.

10. Yao F, Sun J, Tang C, Ni W / Kinetics of ammonium, nitrate and phosphate uptake by candidate plants used in constructed wetlands // Procedia Environ Sci. – 2011. – 10. – pp. 1854–1861

11. Lin Y.F., Jing S.R., Lee, D.Y., Wang T.W. / Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system // Aquaculture. – 2002. – 20. – pp. 169–184.

12. Sindilariu P.D., Brinker A., Reiter R. / Factors influencing the efficiency of constructed wetlands used for the treatment of intensive trout farm effluent // Ecol. Eng. – 2009. – 35. – pp. 711–722.

13. Barak Y., J. van Rijn / Biological phosphate removal in a prototype recirculating aquaculture treatment system // Aquacultural Engineering. – 2000. – 22. – pp. 121–136.

Рецензія/Peer review : 26.09.2017 р. Надрукована/Printed :27.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.912

О.В. БАРМАК, О.В. МАЗУРЕЦЬ, В.І. КЛІМЕНКО
Хмельницький національний університет

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ

В статті досліджено проблему підвищення якості перевірки рівня отриманих знань шляхом автоматизації формування тестових завдань. Встановлено, що в умовах широкого використання спеціалізованих віртуальних навчаючих середовищ потенційна якість перевірки рівня отриманих освітніх послуг безпосередньо визначається якістю тестів. Розглянуто інформаційну технологію автоматизованого формування тестових завдань, що забезпечує максимально рівномірне та широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу, а також можливість перенесення наборів тестових завдань у середовище Moodle. Тест, що одержується в результаті роботи, може бути використаний як безпосередньо для тестування, так і як сировина для подальшої роботи розробника тестів. Описано тестовий програмний продукт, що реалізує запропоновану інформаційну технологію автоматизованого формування тестових завдань й дозволяє підтвердити її високу практичну та наукову цінність.

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

O. BARMAK, O. MAZURETS, V. KLIMENKO
Khmelnytsky National University

INFORMATION TECHNOLOGY OF AUTOMATED CREATION OF TEST TASKS

The article examines the problem of improving the examination quality of the level of obtained knowledge using automated generating of test tasks. It has been established that in the widespread use of specialized virtual learning environments, the potential examination quality of knowledge level is directly determined by the quality of the tests. Given information technology of the automated test creation, provides the maximum uniform and wide coverage all the semantics of the educational material, as well as the possibility to export 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. Described test software implements the proposed information technology for the automated tests tasks generating and allows to prove its high practical and scientific value.

Keywords: testing, test exercises, educational materials, Moodle, key terms.

Постановка проблеми в загальному вигляді

З розвитком нових технологій та постійним підвищенням рівня інформатизації суспільства й освіти проблема ефективного контролю знань набуває особливого значення. Важливу роль в її розв’язанні відіграють комп’ютерні засоби перевірки знань [1]. Однією з найбільш поширених форм перевірки знань є комп’ютерне тестування. В більшості випадків метою тестування є визначення рівня засвоєння відповідних навчальних матеріалів. Відтак навчальні матеріали у вигляді цифрових документів визначеної структури як інструмент навчання, й тести як інструмент контролю рівня отриманих знань об’єднуються в курси навчальних дисциплін.

Застосування інформаційних технологій в навчанні покликане індивідуалізувати процес навчання, забезпечити оперативний самоконтроль і контроль з діагностикою помилок і оберненим зв’язком, що в навчальних системах реалізується засобами тестування, яке застосовується не тільки для контролю, а й навчання, тренінгу, розвитку когнітивних здібностей.

Тестова перевірка включає в себе набір тестових завдань різної складності, що робить результат тестування більш об’єктивним. За допомогою ретельного конструювання тесту можна забезпечити відповідний рівень дискримінативності, в чому тести мають перевагу над іншими формами визначення рівня знань. Розробка тесту (набору тестових завдань) для перевірки якості засвоєння визначеної 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].

Зі змістовної точки зору, ключовою властивістю контенту навчального матеріалу є його семантика, яку формалізовано відображають у вигляді семантичної мережі, вузлами якої є терміни, що несуть смислове навантаження, а дуги відображають характер зв’язку між вузлами [3]. Зв’язок між термінами навчальних матеріалів залежить від багатьох факторів (галузь знань, тип лекції, літературні здібності автора тощо) й може змінюватися у широких межах без втрати якості викладання, що знижує актуальність його аналізу. Тому переважно перевірка розуміння саме термінів, що вводяться й розглядається у навчальних матеріалах, дозволяє визначити рівень засвоєння цих навчальних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень

Проблеми автоматизації процесу тестування і обробки його результатів ґрунтовно досліджені в літературі. Однак, задачі автоматизації формування банку тестових завдань досліджені в недостатній мірі [4]. 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.

У той час, як багато досліджень у галузі комп'ютерного контролю знань зосереджені на питаннях валідності і надійності тестів [2], питання формування самого банку завдань у більшості випадків залишається виключно прерогативою розробника, який працює без використання інтелектуальних засобів автоматизації даного процесу. Прагнення автоматизувати формування тестових завдань наштовхуються на область штучного інтелекту і на проблеми формалізації знань та їх подальшого використання в генерації тестів. Традиційний підхід до створення засобів тестування фактично являє собою комп'ютеризацію ручного тестування. Суть такого підходу полягає у використанні інформаційно-комунікаційних технологій замість паперової роботи, що дає додаткові можливості щодо управління формуванням тестів з банку створених тестових завдань та автоматичної перевірки результатів. За таких умов завдання, професійно розроблені експертом, мають високу якість і зрозумілість; однак істотним недоліком підходу є висока трудомісткість самого процесу формування тестових завдань.

Різноманітним аспектам тестування, створення і застосування навчальних і тестувальних систем на базі сучасних інформаційних технологій, питанням розробки баз даних і баз знань програмних систем перевірки рівня знань присвячені численні праці українських та закордонних авторів: Аванесова В. С., Башмакова І. А., Клайна П., Гагаріна О. О., Титенка С. В., Пасічника В. В., Тонконогого В. М., Brusilovsky P., 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. Так, ряд авторів за результатами дослідження в напрямку автоматизації створення тестових завдань розглядає практичне застосування технології автоматизації тестування на основі понятійно-тезисної моделі [5]. Даний підхід визначає, що смислова інформація, яка буде формалізуватися у семантиці моделі, виділяється безпосередньо із тексту навчального фрагменту, а власне процес формування бази знань фактично являє собою осмислене читання навчального тексту [6]. Для реалізації ж процесу наповнення понятійно-тезисної бази знань пропонується спеціальний програмний інтерфейс, за допомогою якого після заповнення необхідних даних видобуте із навчального тексту поняття додається в базу знань. Генерація тестів відбувається на основі семантичних даних понятійно-тезисної бази знань, а основним вхідним параметром тут є вказівка на ділянку навчального матеріалу, по якій іде тестування.

Серед інших відомих методів і засобів автоматичної генерації тестових завдань необхідно відзначити методи параметризованих тестів, використання семантичних мереж та семантичних класів [7]. Основними недоліками даних підходів є створення завдань з низькою педагогічною цінністю, відсутність аналізу складності завдань, а також значні витрати на підготовку вхідної інформації. Параметризовані тести обмежені областю застосування, так як добре підходять для точних наук і програмування, проте погано підходять для інших напрямків навчання. Семантичні мережі і інші класичні моделі знань характеризуються суттєвими складностями в разі їх застосування з освітніми цілями. Тому подальші вишукування в напрямку автоматизації процесу формування тестових завдань залишаються актуальними.

Для розробки й використання навчальних матеріалів навчальних дисциплін, а також для формування й проходження тестів, на сучасному етапі широко використовуються спеціалізовані віртуальні навчаючі середовища, найбільш відомим із яких є Moodle [8]. При їх використанні, потенційна якість перевірки рівня отриманих освітніх послуг безпосередньо визначається якістю тестів.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань, що забезпечує максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу, та можливість трансферу наборів тестових завдань у середовище Moodle

Викладення основних матеріалів дослідження

Автоматизація формування тестових завдань [9] є однією з задач підвищення якості перевірки рівня отриманих знань поряд з автоматизацією визначення термінів у навчальних матеріалах, побудови онтології навчального матеріалу та гнучкого тестування рівня знань. В попередніх публікаціях було розглянуто ряд інформаційних технологій, що дозволяє вирішити поставлену проблему (рис. 1).

Оскільки тести є засобом перевірки якості засвоєння сенсу навчальних матеріалів й ставлять на меті задачу перевірки якості засвоєння ключових термінів як складових семантичних одиниць навчальних матеріалів, то автоматизація визначення семантичних термінів у навчальних матеріалах дозволяє забезпечити допомогу та контроль при розробці наборів тестових завдань. *Інформаційна технологія визначення термінів у навчальних матеріалах* [10] призначена для автоматизованого визначення семантичних термінів (слів, словосполучень та абревіатур) у контенті навчальних матеріалів з використанням дисперсійного оцінювання. Вхідними даними є цифровий документ (.doc, .docx, .pdf) навчального матеріалу, призначеного для обробки. Пошук термінів відбувається поокремо в параграфах досліджуваного навчального матеріалу й в результаті одержуються сортовані переліки ключових термінів. Сортування проводиться за зростанням їх семантичного значення в межах досліджуваного фрагменту на основі дисперсійного оцінювання. За результатами проведених досліджень прикладної ефективності інформаційної технології визначення термінів у навчальних матеріалах встановлено, що такий програмний аналіз контенту навчального матеріалу дозволяє визначити множину слів, близьку до множини,

сформованої експертом (автором курсу).

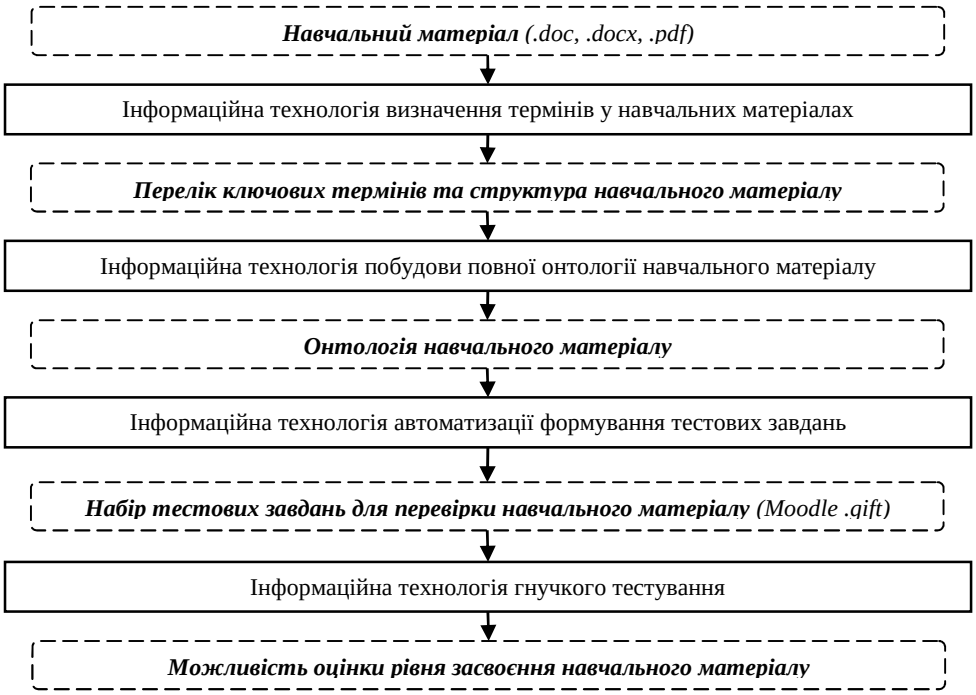


Рис. 1. Комплекс інформаційних технологій для підвищення якості перевірки рівня отриманих знань

Зважаючи на існуючі загальноприйняті вимоги до структури навчальних матеріалів навчальних дисциплін (наприклад: Назва дисципліни / Розділ / Тема), яка відображає семантичну структуру навчального матеріалу, навчальні матеріали як електронні документи відбивають відповідну онтологію своєю структурою. Стилістичні вимоги до оформлення цифрових документів навчальних матеріалів вимагають використання для цього спеціальних стилів (наприклад, назви дисциплін відповідатимуть елементам стандартного стилю «Заголовок 1», назви розділів – «Заголовок 2», назви тем – «Заголовок 3» тощо). Таким чином, структура цифрових документів навчальних матеріалів регламентується мовами розмітки цифрових документів (наприклад, WordprocessingML [11] для XML) й реалізується через систему заголовків. *Інформаційна технологія побудови повної онтології навчального матеріалу* [12] дозволяє побудову верхніх рівнів онтології навчального матеріалу дисципліни шляхом аналізу стилів, що використовуються в цифровому документі, а прив'язка до елементів онтології переліків ключових термінів дозволяє семантично сформувати нижній рівень повної онтології. Вхідними даними для технології є цифровий документ навчального матеріалу для визначення структури та сортовані переліки ключових термінів для побудови повної онтології навчального матеріалу. Одержана повна онтологія навчального матеріалу, що є вихідними даними технології, відображає семантичну структуру навчального матеріалу, при цьому нижній рівень онтології (ключові терміни) є областю вивчення в межах навчального матеріалу. Рівень засвоєння семантичного навантаження ключових термінів відповідно до структури навчального матеріалу і є об'єктом перевірки при тестуванні.

Інформаційна технологія гнучкого тестування використовує вхідні дані у вигляді репрезентативних наборів тестових завдань для адаптивного вибору тестових завдань в процесі тестування [13]. Дана технологія забезпечує охоплення максимальної кількості блоків навчального матеріалу при тестуванні; забезпечує низхідний аналіз рівня засвоєння матеріалу, що починається з перевірки розуміння найбільш семантично вагомих термінів й поступово переходить до менш важливих термінів; дозволяє мінімізувати затрачений на процес тестування час при збереженні об'єктивного оцінювання рівня знань. Результатом прикладного використання інформаційної технології гнучкого тестування безпосередньо є підвищення якості перевірки рівня отриманих знань у процесі тестування.

Запропонована *інформаційна технологія автоматизації формування тестових завдань* призначена для автоматизованого формування збалансованого набору тестових завдань для перевірки засвоєння семантичного змісту термінів навчального матеріалу. Вхідними даними для застосування інформаційної технології автоматизації формування тестових завдань є наступні елементи, що створюються на попередньому етапі:

- контент навчального матеріалу, що підлягає перевірці;
- структура навчального матеріалу;
- сортовані переліки ключових термінів з прив'язкою до елементів структури навчального матеріалу.

Варто зауважити, що структура навчального матеріалу й переліки ключових термінів, співвіднесені з елементами структури навчального матеріалу, утворюють повну онтологію навчального матеріалу [14].

В основі функціонування інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань є використання набору правил перетворення фрагментів контенту у тестові завдання. Для цього спочатку встановлюються вимоги до набору тестових завдань, визначаються актуальні правила конвертації й на основі найбільш прийнятних із них формується набір тестових завдань, як це показано на рис. 2.

Визначення вимог до набору тестових завдань (Блок 1) передбачає, за необхідності, зміну користувачем параметрів тесту по замовчуванню. Так, хоча загальноприйнятим є введення в рамках структурної одиниці навчального матеріалу 3–7 термінів, обсяг й різновид лекції та специфіка предмету викладення можуть впливати на цю кількість. Змінними параметрами, що впливають на формування набору тестових завдань, є:

- кількість ключових термінів із початку переліку, що перевіряються;
- запланована кількість тестових завдань;
- типи тестових завдань, що можна використовувати в даному тесті, та їх баланс.

Актуалізація правил конвертації (Блок 2) визначає перевірку можливості застосування кожного із правил конвертації для створення тестового завдання на основі кожного фрагменту використання кожного терміну із заданого переліку. Для правил, що актуалізувалися, обраховуються оцінки, залежно від впливу заданих особливостей фрагменту. Після цього формується таблиця покриття контенту (табл. 1), у якій представлені всі актуалізовані правила з їх параметрами.

Формування набору тестових завдань (Блок 3) починається з відбору оптимальної вибірки правил з числа тих, що включені у таблицю покриття контенту. Для цього, зважаючи на наявні обмеження (вхідні вимоги, баланс параметрів та оцінки якості використання правил), із загального переліку формується вибірка випадків, що будуть використані для формування контенту тестових завдань. В результаті для кожного випадку відповідне правило сформує одне тестове запитання у форматі .gift, що може бути імпортований у середовище Moodle. Таким чином, кінцевий результат зберігається в одному файлі тесту, який є вихідними даними інформаційної технології.

Рис. 2. Схема інформаційної технології автоматизованого формування тестових завдань

Таблиця 1

Структура таблиці покриття контенту

Термін	№ фрагменту (абзацу), що використовується для перевірки	№ правила конвертації	№ типу тестового завдання	Оцінка якості використання правила
…	…	…	…	…

Правило конвертації являє собою структуру (рис. 3), що складається з функціональних елементів:

- маска для фрагменту тексту з поняттям, що призначена для ідентифікації фрагментів контенту із заданим терміном, до яких воно може бути застосовано;

- параметри правила, що визначають особливості й ефективність його застосування: тип запитання, що може бути створено за цим правилом; базова оцінка очікуваної якості застосування правила у діапазоні (0;1), що одержується методом експертної оцінки результатів; набір правил корекції базової оцінки цього правила конвертації, що залежно 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.

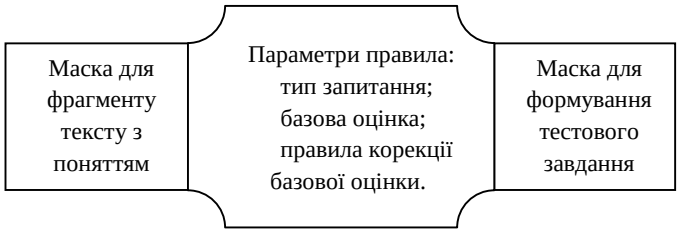


Рис. 3. Структура правила конвертації

```
[BeginSentence] [GroupTermTarget] [“ - це ”]
[ThesisTermTarget] [“:” / “;” / “.”]
```

Рис. 4. Програмний приклад правила конвертації

Наприклад, представлене на рисунку 4 правило конвертації, що містить ряд параметрів (рис. 5), за необхідності формування тестового завдання типу №2 (вибір одної відповіді з кількох запропонованих) до терміну «система керування базами даних», може бути актуалізоване фрагментом тексту, вказаним на рис. 6.

```
№ типу тестового завдання: 2;
Базова оцінка (Б0): 1,0;
Правила корекції Б0:
 – якщо речення довше 30 слів, то Б0 множиться на 0,9 за кожні
   10 зайвих слів;
 – якщо поняття (термін з допоміжними словами дозволеного виду,
   [GroupTermTarget]) більше 8 слів, то Б0 множиться на 0,8 за
   кожне 1 зайве слово;
 – якщо у вірній тезі [ThesisTermTarget] більше 2 дієслів, то
   Б0 множиться на 0,9 за кожне 1 зайве дієслово.
```

Рис. 5. Приклад параметрів правила конвертації

Система керування базами даних – це система спеціальним чином організованих даних – баз даних, програмних, технічних, мовних, організаційно-методичних засобів, призначених для забезпечення централізованого нагромадження й колективного багатоцільового використання даних.

Рис. 6. Фрагмент тексту, що актуалізує правило конвертації

```
[“ // Початок питання: ПитЗВибором
”] [Caps] [GroupTermTarget] [“ - це:
=a. ”] [ThesisTermTarget] [“ ;
~b. ”] [ThesisTermRandomOther] [“ ;
~c. ”] [ThesisTermRandomOther] [“ ;
~d. ”] [ThesisTermRandomOther] [“ .
} ”]
```

Рис. 7. Приклад маски для формування тестового завдання

Дане правило конвертації, що містить вказану на рис. 7 маску для формування тестового завдання, конвертує цей контент у тестове запитання в форматі .gift (рис. 8), що у середовищі Moodle прийме вигляд, представлений на рисунку 9.

Отже, запропонована інформаційна технологія автоматизованого формування тестових завдань забезпечує максимально рівномірне і широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу, та можливість перенесення наборів тестових завдань у систему Moodle.

```
// Початок питання: ПитЗВибором
Система керування базами даних - це: {
=a. система спеціальним чином організованих даних - баз
даних, програмних, технічних, мовних, організаційно-методичних
засобів, призначених для забезпечення централізованого
нагромадження й колективного багатоцільового використання даних.
~b. іменована сукупність даних, що відбиває стан об’єктів і
їхнє відношення в розглянутій предметній області.
~c. сукупність мовних і програмних засобів, призначених для
створення, ведення й спільного використання БД багатьма
користувачами.
~d. програма, за допомогою якої користувач працює з базою даних.
}
```

Рис. 8. Приклад тестового запитання у форматі gift для середовища Moodle

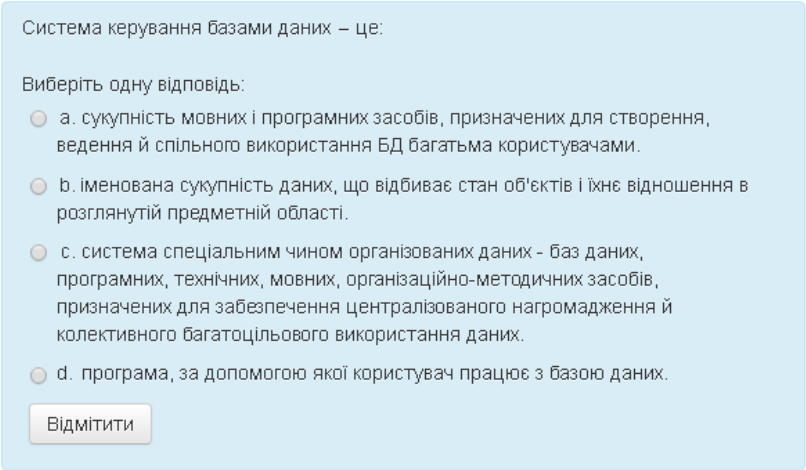


Рис. 9. Приклад сформованого у середовищі Moodle тестового запитання

Програмна реалізація

З метою перевірки ефективності запропонованої технології автоматизованого формування тестових завдань, було створено відповідний тестовий програмний продукт. Автоматизована система формування тестів «Semantic Test Generator», реалізована з використанням мови програмування C# на платформі .NET Framework, дозволяє автоматизовано формувати структуру цифрових документів навчальних матеріалів й проводити пошук ключових термінів у відповідних фрагментах, формуючи в результаті повну онтологію навчального матеріалу. Також система дозволяє за введеними параметрами (кількість ключових термінів із початку переліку, що перевіряються; запланована кількість тестових завдань; типи тестових завдань, що можна використовувати в даному тесті, та їх баланс) автоматично створити набір, тестові завдання якого збалансовані відповідно онтології навчального матеріалу й у максимальній мірі відповідають заданим вимогам.

Програмно розроблена система складається з 4 модулів, кожен з яких в свою чергу складається з декількох класів (рис. 10, 11). Головний модуль складається з класу MainForm – головної форми, й використовується для керування усім функціоналом системи.

Модуль, що відповідає за реалізацію основної логіки, складається з ряду класів, основні з них:

1) Engine – проміжний клас, що реагує на події, що відбуваються на формі. Його методи створюють об’єкти класів відповідно до події і повертають дані роботи класів;

2) DispersiveEstimate – реалізує процес знаходження ключових слів у тексті за допомогою методу дисперсійної оцінки;

3) Document – являє собою відкритий файл і повертає список абзаців та їх стилів.

4) Content – поточний обраний модуль лекції, містить інформацію про форматування та зберігає знайдені ключові слова та словосполучення.

Модуль, що відповідає за генерацію тестів являє собою маски та параметри масок, містить 2 класи:

1) TermMask – маска для фрагменту тексту з поняттям, призначена для ідентифікації фрагментів контенту із заданим терміном, до яких воно може бути застосовано;

2) TestMask – маска для формування тестового завдання, що містить алгоритм перетворення даного фрагменту у елементи тестового завдання.

Модуль, що відповідає за побудову онтологій, складається з 2 класів:

1) FileParser – дозволяє зчитувати текст з документів та запам’ятовує форматування для конкретного тексту, надає можливості для побудови онтологій документів;

2) LectionNode – є онтологічною одиницею документу.

Для зручного переміщення даних між модулями програми, використовуються класи-представлення: FormattedText, KeyWord, PotentialTerm, WordGroup.

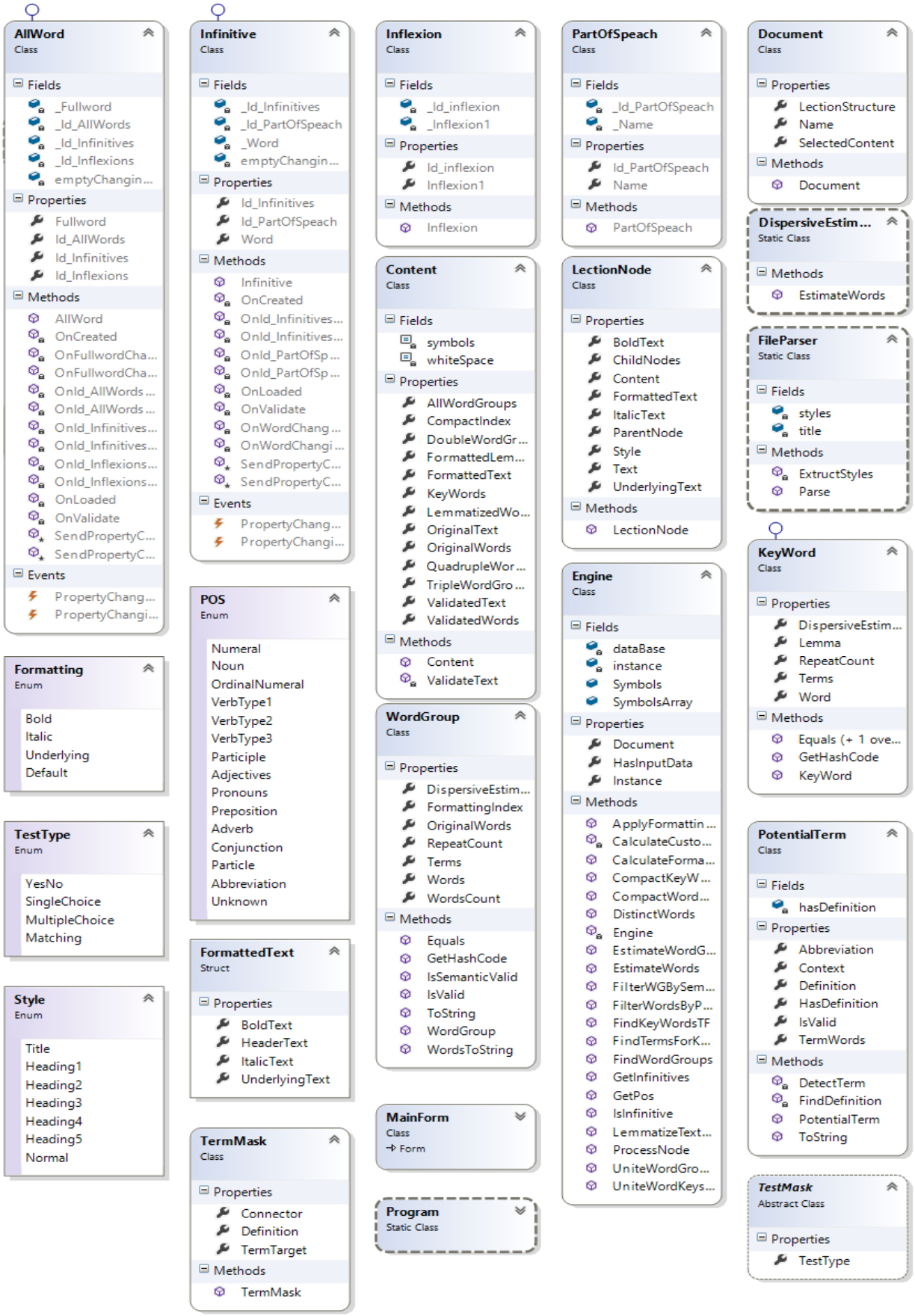


Рис. 10. Діаграма класів системи автоматизованого формування тестових завдань

Розроблена структура класів дозволяє реалізувати основні функції системи, такі як зчитування інформації із файлів, пошук ключових слів, побудова повної онтології та генерація тестових завдань. При запуску програми (рис. 11) з'являється головна форма, що дозволяє обрати файл цифрового документу навчального матеріалу. За результатами аналізу формується й відображається на формі у вигляді вкладеного переліку структура цифрового документу – верхній рівень онтології навчального матеріалу. Для зчитування абзаців тексту використовується безкоштовна бібліотека DocX групи розробників Novacode [15]. Для отримання абзаців та назв їх стилів використовується властивість Paragraphs класу DocX, що є списком абзаців. Для отримання тексту та назви стилю використовуються властивості Paragraphs.StyleName та Paragraphs.Text. При виборі вузла онтології на формі відображається контент відповідного елемента навчального матеріалу.

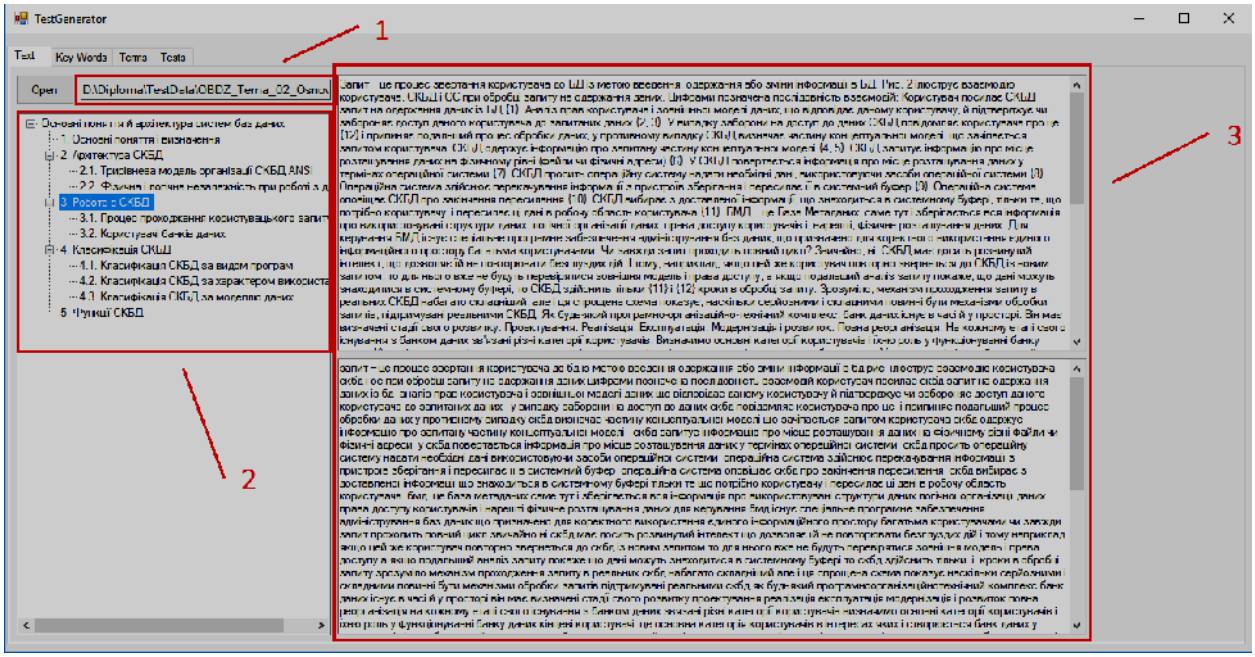


Рис. 11. Головна форма інтерфейсу системи
(1 – шлях до файлу навчального матеріалу; 2 – схема онтології навчального матеріалу; 3 – контент обраного вузла онтології навчального матеріалу)

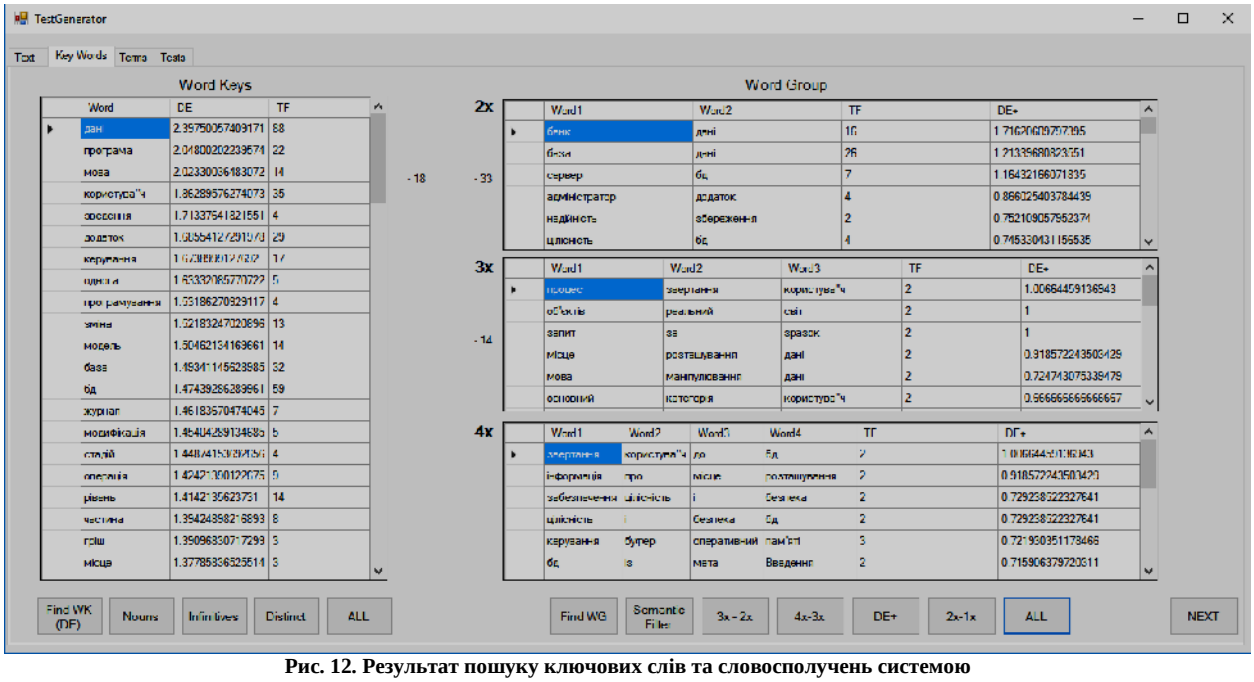


Рис. 12. Результат пошуку ключових слів та словосполучень системою

Наступна вкладка (рис. 12) в інтерфейсі демонструє результати пошуку ключових слів методом дисперсійної оцінки [16] та формуванню з них словосполучень із 2-х, 3-х та 4-х слів. У таблицях використовуються позначення TF та DE, де TF – частота повторень даного елемента, DE – його дисперсійна оцінка або похідний коефіцієнт важливості.

Для формування вихідної множини термінів проводиться інтеграція множини ключових слів та

множини ключових словосполучень (рис. 13). На цьому етапі відбувається заміщення словосполученнями слів, які є переважно елементами відповідних словосполучень. Результатом етапу є об'єднана вихідна множина термінів. З елементами вихідної множини проводиться подальша обробка залежно від їх типу. В її процесі слова приводяться до нормальної форми, а в словосполученнях проводиться узгодження слів. Для формування результуючої множини термінів отримана множина компактифікується шляхом видалення повторів серед її елементів [17].

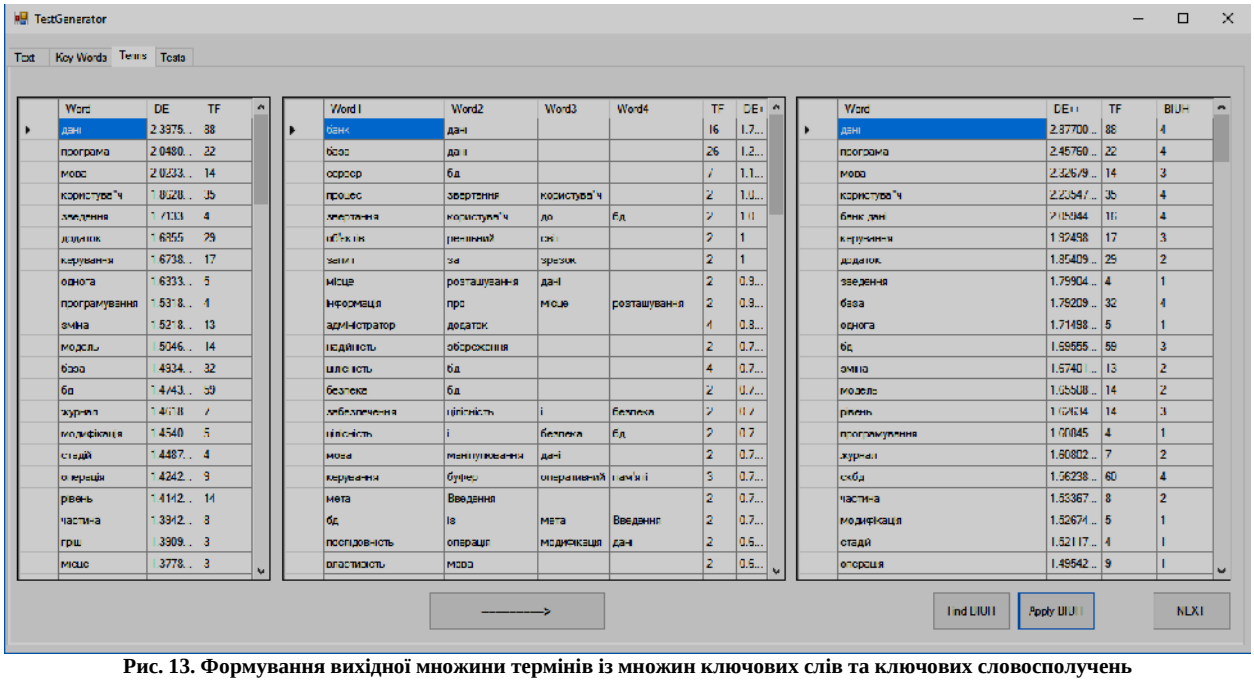


Рис. 13. Формування вихідної множини термінів із множин ключових слів та ключових словосполучень

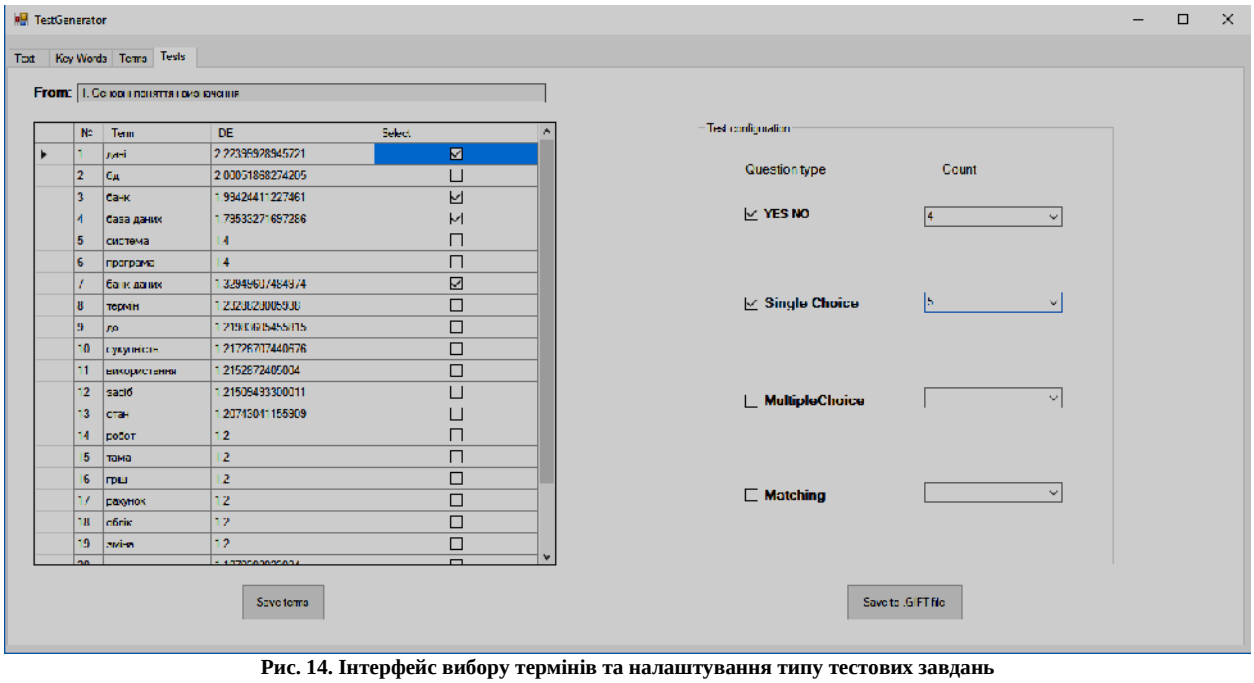


Рис. 14. Інтерфейс вибору термінів та налаштування типу тестових завдань

Завершальна форма, що зображена на рисунку 14, дає змогу при необхідності обрати терміни, на основі яких мають генеруватись тестові питання, а також типи та кількість тестових завдань.

За обраними параметрами система генерує набір тестових завдань із можливістю їх збереження в форматі .gift файлу, який надає можливість перенесення наборів тестових завдань у систему Moodle.

Дискусія

Тестування розробленої системи автоматизованого формування тестових завдань підтвердило можливість та ефективність запропонованого підходу до автоматизації розробки тестів. Виявлено, що безпосередньо ефективність виконання поставленої задачі системою залежить ряду факторів:

1) Кількість і різноманітність правил генерації тестових завдань, які безпосередньо впливають як на різноманітність доступних для генерації варіантів тестового завдання за окремим фрагментом тексту, так і

на можливість використання максимального обсягу контенту для формування тестових завдань.

2) Ступінь дотримання термінологічних вимог розробником навчальних матеріалів, що вимагають усунення неоднозначного іменування термінів. Неоднозначне іменування термінів в навчальних матеріалах свідчить про недотримання норм формування та ведення наукової літератури. Хоча є допустимим використання абревіатур, напівскорочень та повних назв (наприклад, «СКРБД», «Система керування РБД», «Система керування розподіленими базами даних»), зокрема кількома мовами (наприклад, українською та англійською – «мережа Інтернет» та «мережа Internet»), для використання в рамках окремого навчального матеріалу обирається лише один варіант, оскільки як для машинної, так і для розумової ідентифікації термінів бажаною (а в науковій літературі – обов'язковою) є уніфікація ідентифікатора. Навіть у випадку введення нового скорочення, в цій же позиції у тексті присутня також і повна назва. Відповідно, усунення неоднозначної іменованості термінів дозволить уникнути випадків, коли при автоматичному чи ручному аналізі контенту навчальних матеріалів одне поняття буде розглядатись як кілька окремих термінів.

3) Ступінь дотримання семантичних вимог розробником навчальних матеріалів, що визначають в значній мірі важко формульовані цілі філологічного характеру при оформленні навчальних матеріалів. Наприклад, контроль за вживанням слів-«паразитів», відповідність контенту елементу навчального матеріалу його оголошеній назві, уникнення непослідовного викладення матеріалу тощо. Хоча контроль дотримання семантичних вимог є важко досяжною задачею, їх недотримання погіршує як антропічне, так і технічне сприйняття навчальних матеріалів, тому дані вимоги ставлять за мету дотримання семантичної якості подання матеріалу в максимально можливій мірі.

4) Ступінь дотримання стилістичних вимог розробником навчальних матеріалів, що полягають у коректному використанні стилів при форматуванні контенту. Відповідно до документальної моделі даних, контент цифрових документів складається із блоків визначених типів (текстовий, заголовковий, рисунковий, табличний, формульний, лістинговий тощо), для кожного з яких визначаються власні правила оформлення й відображення, що реалізується шляхом створення й використання відповідних стилів. Для ефективності застосування розглядуваної інформаційної технології важливо, щоб стилі заголовків та звичайного тексту використовувались коректно і за призначенням. Проте недотримання таких норм стилістичних вимог має наслідком низьку візуальну якість контенту навчальних матеріалів, що знижує ефективність його сприйняття також і реципієнтом.

За умови достатньої відповідності наведеним 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 було досліджено проблему підвищення якості перевірки рівня отриманих знань шляхом автоматизації формування тестових завдань. Встановлено, що за умов широкого використання спеціалізованих віртуальних навчаючих середовищ потенційна якість перевірки рівня отриманих освітніх послуг безпосередньо визначається якістю тестів. Розглянуто інформаційну технологію автоматизованого формування тестових завдань, що забезпечує максимально рівномірне та широке охоплення набором тестових завдань семантики навчального матеріалу, та можливість перенесення наборів тестових завдань у середовище Moodle. Описано тестовий програмний продукт, що реалізує запропоновану інформаційну технологію автоматизованого формування тестових завдань й дозволяє підтвердити її високу практичну та наукову цінність. Подальші дослідження спрямовані на поповнення бази правил генерації тестових завдань, що дозволить збільшити як на різноманітність доступних для генерації варіантів тестового завдання за окремим фрагментом тексту, так і на можливість охоплення максимального обсягу контенту навчального матеріалу для формування набору тестових завдань.

Література

1. Снитюк В. Е. Интеллектуальное управление оцениванием знаний / В. Е. Снитюк, К. Н. Юрченко. − Черкассы, 2013. − 262 с.

2. Аванесов В. С. Композиция тестовых заданий : учебная книга для преподавателей вузов, учителей школ, аспирантов и студентов пед. вузов / Аванесов В. С. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Адепт, 1998. – 218 с.

3. Давид Марка Методология структурного анализа и проектирования / Давид Марка, Клемент МакГоуэн ; [пер. с англ.]. – М., 1993. – 240 с.

4. 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.

5. Титенко С. В. Практична реалізація технології автоматизації тестування на основі понятійно-тезисної моделі [Електронний ресурс] / С. В. Титенко, А. А. Гагарін. – Режим доступу : http://www.setlab.net/?view=Tytenko_Virt06

6. Титенко С. В. Генерація тестових завдань у системі дистанційного навчання на основі моделі формалізації дидактичного тексту / С. В. Титенко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2009. – № 4. – С. 47–57.

7. Мельник А. М. Метод генерації тестових завдань на основі системи семантичних класів / А. М.

Мельник, Р. М. Пасічник // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15. – № 1. – С. 187–193.

8. Moodle – вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. − Режим доступу : http://uk.wikipedia.org/wiki/Moodle

9. Мазурець О. В. Автоматизація формування тестових завдань / О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами десятої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2016». – Хмельницький, 2016. – С. 126–133.

10. Бармак О. В. Інформаційна технологія автоматизованого визначення термінів у навчальних матеріалах / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2015. – № 2. – С. 94–102.

11. Сайт Microsoft для розробників OpenXMLDeveloper [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://openxmldeveloper.org/

12. Мазурець О. В. Інформаційна технологія побудови онтологічної моделі навчального курсу для оцінювання отриманих знань / О. В. Мазурець // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології». – Одеса, 2014. – С. 81–83.

13. 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. Серія: Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 103–115.

14. Даревич Р. Р. Підвищення ефективності інтелектуального аналізу тесту шляхом зважування понять моделі онтології / Р. Р. Даревич // Штучний інтелект. – 2005. – № 3. – С. 571–577.

15. DocX for creates or modifies Microsoft Word files [Електронний ресурс]. − Режим доступу : https://github.com/xceedsoftware/DocX

16. Бармак О. В. Методи автоматизації визначення семантичних термінів у навчальних матеріалах / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2(223). – С. 209–213.

17. Крак Ю. В. Практичне дослідження ефективності інформаційної технології автоматизованого визначення семантичних термінів в контенті навчальних матеріалів / Ю. В. Крак, О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Прикладне програмне забезпечення : збірник наукових праць за матеріалами десятої міжнародної науково-практичної конференції по програмуванню «УкрПРОГ'2016». – Київ, 2016. – С. 237–245.

References

1. Snitjuk V. E. Intellektual'noe upravlenie ocenivaniem znanij / V. E. Snitjuk, K. N. Jurchenko. − Cherkassy, 2013. − 262 s.

2. Avanesov V. S. Kompozicija testovyh zadanij : uchebnaja kniga dlja prepodavatelej vuzov, uchitelej shkol, aspirantov i studentov ped. vuzov / Avanesov V. S. – 2-e izd., ispr. i dop. – M. : Adept, 1998. – 218 s.

3. David Marka Metodologija strukturnogo analiza i proektirovanija / David Marka, Klement MakGoujen ; [per. s angl.]. – M., 1993. – 240 s.

4. Klimenko V. I. Analiz suchasnih metodiv generacії testovih zavdan' / V. I. Klimenko, O. V. Mazurec' // Zbirnik naukovih prac' za materialami desjatoї mizhnarodnoї naukovo-tehnichnoї konferencії «Aktual'ni problemi komp'juternih tehnologij 2016». – Hmel'nic'kij, 2016. – S. 77–84.

5. Titenko S. V. Praktichna realizacija tehnologії avtomatizacії testuvannja na osnovi ponjatijno-tezisnoї modeli [Elektronnij resurs] / S. V. Titenko, A. A. Gagarin. – Rezhim dostupu : http://www.setlab.net/?view=Tytenko_Virt06

6. Titenko S. V. Generacija testovih zavdan' u sistemi distancijnogo navchannja na osnovi modeli formalizacії didaktichnogo tekstu / S. V. Titenko // Naukovi visti NTUU "KPI". – 2009. – № 4. – S. 47–57.

7. Mel'nik A. M. Metod generacії testovih zavdan' na osnovi sistemi semantichnih klasiv / A. M. Mel'nik, R. M. Pasichnik // Visnik TDTU. – 2010. – Tom 15. – № 1. – S. 187–193.

8. Moodle – vil'na enciklopedija [Elektronnij resurs]. − Rezhim dostupu : http://uk.wikipedia.org/wiki/Moodle

9. Mazurec' O. V. Avtomatizacija formuvannja testovih zavdan' / O. V. Mazurec' // Zbirnik naukovih prac' za materialami desjatoї mizhnarodnoї naukovo-tehnichnoї konferencії «Aktual'ni problemi komp'juternih tehnologij 2016». – Hmel'nic'kij, 2016. – S. 126–133.

10. Barmak O. V. Informacijna tehnologija avtomatizovanogo viznachennja terminiv u navchal'nih materialah / O. V. Barmak, O. V. Mazurec' // Mizhnarodnij naukovo-tehnichnij zhurnal «Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah». – Hmel'nic'kij, 2015. – № 2. – C. 94–102.

11. Sajt Microsoft dlja rozrobnikiv OpenXMLDeveloper [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://openxmldeveloper.org/

12. Mazurec' O. V. Informacijna tehnologija pobudovi ontologichnoї modeli navchal'nogo kursu dlja ocinjuvannja otrimanih znan' / O. V. Mazurec' // Materiali III mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії «Informacijni upravljajuchi sistemi ta tehnologії». – Odesa, 2014. – S. 81–83.

13. Barmak O. V. Zastosuvannja informacijnoї tehnologії gnuchkogo testuvannja rivnja znan' u seredovishhi Moodle / O. V. Barmak, O. V. Mazurec', A. O. Matvijchuk // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – 2017. – № 3. – S. 103–115.

14. Darevich R. R. Pidvishhennja efektivnosti intelektual'nogo analizu testu shljahom zvazhuvannja ponjat' modeli ontologії / R. R. Darevich // Shtuchnij intelekt. – 2005. – № 3. – S. 571–577.

15. DocX for creates or modifies Microsoft Word files [Elektronnij resurs]. − Rezhim dostupu : https://github.com/xceedsoftware/DocX

16. Barmak O. V. Metodi avtomatizacії viznachennja semantichnih terminiv u navchal'nih materialah / O. V. Barmak, O. V. Mazurec' // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – 2015. – № 2(223). – S. 209–213.

17. Krak Ju. V. Praktichne doslidzhennja efektivnosti informacijnoї tehnologії avtomatizovanogo viznachennja semantichnih terminiv v kontenti navchal'nih materialiv / Ju. V. Krak, O. V. Barmak, O. V. Mazurec' // Prikladne programne zabezpechennja : zbirnik naukovih prac' za materialami desjatoї mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії po programuvannju «UkrPROG'2016». – Kiïv, 2016. – S. 237–245.

Рецензія/Peer review : 20.10.2017 р. Надрукована/Printed :30.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 81’11+32+33:004.9

Ю.О. СЄРОВ, С.С. ФЕДУШКО, Р.О. ГОЛОЩУК
Національний університет «Львівська політехніка»

СИСТЕМА ВЕРИФІКАЦІЇ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ ВЕБ-УЧАСНИКІВ

Розроблення нових результативних засобів верифікації персональних даних та вдосконалення існуючих методів верифікації персональних даних учасників віртуальних спільнот є метою цього дослідження. Програмна реалізація системи верифікації персональних даних веб-учасника та її впровадження в менеджмент віртуальної спільноти підвищить ефективність функціонування цієї спільноти. Розроблена система верифікації соціально-демографічних характеристик веб-учасника є комплексним рішенням, яке задовольнить усі потреби власників та керівників віртуальних спільнот, збільшивши її рентабельність, підвищивши керованість, захищеність від зловмисних дій та ефективність цільової інтернет-реклами, зменшивши загрози порушення законодавства та етичних засад з боку окремих учасників.

Ключові слова: верифікація, віртуальна спільнота, обліковий запис, веб-учасник, персональні дані.

YU.O. SYEROV, S.S. FEDUSHKO, R.O. HOLOSHCHUK
Lviv Polytechnic National University

VERIFICATION SYSTEM OF WEB MEMBERS PERSONAL DATA

The aim of the research – to develop the complex solution that satisfied the all requirements of virtual community owners and managers by increasing its profitability, manageability, and the effectiveness of targeted internet advertising, reducing the threat of violations of law and ethical principles by individual users. Method for verification of socio-demographic characteristics of web community members’ based on computer-linguistic analysis of content of web community members were suggested. The approach is based on results of the computer-linguistic analysis of web communities’ content. Current research often focuses on the determining adequacy of account data of members of virtual community. The developed verification system of web member personal data allows implementing decision support system for professionals in web community management in the field of processing personal data.

Keywords: verification, virtual community, account, web member, personal data.

Постановка задачі.

Верифікація персональних даних учасників зумовила перехід веб-спільнот на якісно новий етап функціонування, де пріоритетом користуються активні веб-учасники, які надають свої персональні дані з великим рівнем надійності та достовірності загалом. Пріоритети функціонування віртуальної спільноти (ВС) її власники визначають на етапі створення проекту, що залежить від обраної тематики та сценарію розвитку спільноти. Велика кількість користувачів ВС і щоденне зростання популярності цих сервісів зумовлює потребу у розроблення автоматизованих програмних засобів, які б значно спростили процедуру їхнього керування та функціонування. Ці завдання зумовили потребу в розробленні програмного комплексу комп’ютерно-лінгвістичного аналізу достовірності персональних даних учасника ВС, який вирішував важливі завдання в управлінні ВС, такі як підвищення керованості ВС та покращення стійкоздатності до зловмисних дій окремих учасників з метою руйнування хорошої комунікативної атмосфери та навіть порушення функціонування ВС; зменшення загроз порушення законодавства та етичних засад з боку окремих учасників у напрямку недопустимих форм мережевого спілкування як таких, що несуть загрозу іншим учасникам (інтернет-шахрайство, педофілія тощо); підвищення ефективності цільової інтернет-реклами шляхом врахування реальних соціально-демографічних характеристик учасників ВС, і, як наслідок, рентабельності проекту з підтримання спільноти.

Верифікація персональних даних веб-користувачів, що чинять протиправні дії, які є образливими для опонентів з психологічного, фінансового, юридичного погляду, зокрема, займаються шантажем, надсилають листи з погрозами, поширюють брехливу і наклепницьку інформацію та займаються іншими видами електронного хуліганства є складним процесом з багатьма проблемами для керівників та власників веб-форумів Укрнету. Вирішення проблем у процесі верифікації персональних даних веб-користувачів полягає у розробленні ефективних методів та засобів комп’ютерно-лінгвістичного аналізу достовірності персональних даних учасника веб-спільноти.

Формулювання цілей. Основними цілями розроблення нових результативних засобів верифікації та вдосконалення існуючих методів верифікації персональних даних веб-користувачів є підвищення ефективності функціонування ВС, що є результатом виконання низки завдань: відсіювання небажаного інформаційного наповнення та підвищення його якості, фільтрація учасників за повнотою заповнення облікового запису персональними даними, зменшення витрат на керування спільнотою, зменшення конфліктних ситуацій у спільноті та автоматизування комп’ютерно-лінгвістичного аналізу / опрацювання інформаційного наповнення тощо. Реалізація наведених завдань вагомо впливає на функціонування веб-спільноти, що дає можливість спростити та пришвидшити виконання обов’язків модератора та адміністратора ВС.

Аналіз досліджень та публікацій. Актуальні завдання сучасних наукових досліджень соціальних спільнот можна поділити на три типи [1]: *правові* [2, 3] – розроблення та вдосконалення системи правил комунікативної поведінки для учасників ВС, *організаційні* [4] – методи покращення функціонування системи ВС та *економічні* [5, 6] – розроблення нових механізмів та підходів до застосування інтернет-

реклами, таргетингу. Однією із важливих проблем аналізу контенту ВС сьогодні є аналіз персональних даних веб-учасника. Попри суттєве значення для подальшого розвитку цієї сфери досліджень досі не розроблено дієвих методів аналізу саме *персональної інформації в обліковому записі учасників віртуальних спільнот*.

Верифікація персональної інформації, що розміщена в глобальній системі WWW, є актуальним та важливим об'єктом наукових досліджень за такими напрямами: *оцінка достовірності інтернет-інформації* [7] *та стратегії оцінювання достовірності та корисності інформації* [8, 9], *релевантність контенту* [10], *достовірність та надійність інтернет-джерел, сприйняття веб-користувачами достовірності контенту* [11], *достовірність та якість персональних даних* [12], *верифікація відео-контенту* [13] та *персональні дані користувачів глобального середовища WWW*. Останній напрям досліджень нині є найменш розвинутим. У цьому напрямі сьогодні виділяють дослідження з верифікації персональних даних учасників ВС [14, 15], зокрема соціально-демографічних (СД) характеристик [16–18] користувачів глобального середовища WWW. Результати наукових досліджень з цього напряму є затребувані широким колом фахівців з організації та функціонування ВС, як таких, що повинні забезпечувати їхню успішність та ефективність. Зважаючи на вище наведений аналіз наукових праць, серед відомих літературних джерел відчутним є брак ґрунтовних досліджень з верифікації персональної інформації користувачів мережі.

Розроблення методів та засобів верифікації персональної інформації веб-учасника

Ефективне функціонування спільноти залежить від ряду чинників, як об'єктивних, так і суб'єктивних. Проте, наявні на сьогодні методи та засоби, що використовуються у глобальних сервісах, в повній мірі не виконують усіх завдань, які б задовольнили потреби власників в управління віртуальними проектами.

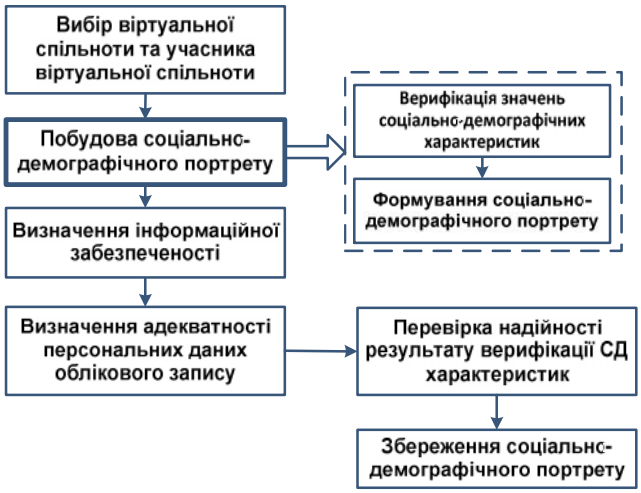


Рис. 1. Схема функціонування системи "Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника"

Розроблення методів та засобів перевірки достовірності персональних даних у обліковому записі користувача є одним з найбільш значимих факторів, які впливають на покращення функціонування ВС. На сьогоднішній день для задач верифікації інформації існують лише дорогі комплексі рішення, які не задовольняють усіх потреб власників в задачі управління віртуальних спільнот. Розроблення якісного та відносно недорогого механізму валідації соціально-демографічних характеристик зумовлене потребою в ідентифікації користувачів на етапі бурхливого розвитку віртуальної спільноти. Розроблення саме програмного засобу верифікації – "Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника" (рис. 1) розв'яже багато актуальних задач в модеруванні та управлінні спільнотами у WWW.

До програмного засобу для верифікації СД портрета веб-учасника ставляться високі вимоги, адже цей засіб в реальному часі повинен опрацьовувати великий масив динамічної інформації. Також треба звертати увагу на постійний ріст активності учасників популярної веб-спільноти, які невпинно генерують не завжди якісне та адекватне, до цілей позиціонування спільноти у WWW, інформаційне наповнення. Звичайно, такий сценарій розвитку спільноти є перешкодою для ефективного функціонування спільноти в конкурентному середовищі. Для вирішення вищенаведених завдань потрібно дотримуватись стандартних вимог до створення програмних інтерфейсів. Проте, зважаючи на специфіку середовищ соціальних комунікацій, варто звернути увагу на деякі спеціальні вимоги до інтерфейсу програмного засобу верифікації: простота у користуванні навіть особі, яка не має профільної освіти, задоволення потреб користувача при розв'язанні конкретної функціональної задач, зрозумілість і логічність виводу результатів, що зменшить час прийняття рішення та покращить їх якість, можливість нарощення функціональності, тобто адаптування та збільшення функціонального блоку програмного засобу відповідно до потреб конкретного учасника – адміністратора чи модератора веб-спільноти та простота аналізу, збереження та використання результатів, впровадження їх у діяльність ВС. Відповідно до цих вимог створено програмне забезпечення для верифікації СД портрета веб-учасника. Користувацький інтерфейс програми "Верифікатор

соціально-демографічних характеристик веб-учасника” з результатами верифікації СД характеристик учасника веб-форуму “Львів. Форум Рідного Міста" представлено на рис. 2.

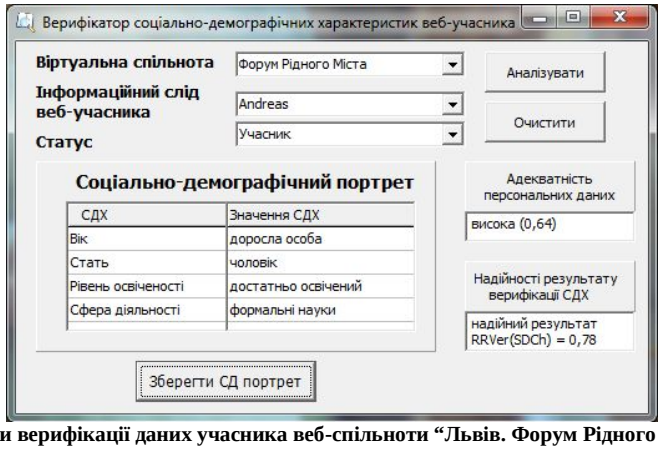


Рис. 2. Результати верифікації даних учасника веб-спільноти “Львів. Форум Рідного Міста“ – Andreas

Апробацію системи валідації даних “Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасників” здійснено у веб-спільноті “Львів. Форум Рідного Міста”. Провівши аналіз достовірності СД характеристик учасників цієї веб-спільноти, отримано такі результати (рис. 3): висока адекватність даних облікового запису – 21% облікових записів; середня адекватність – 41%; низька адекватність – 38%.

Рис. 3. Результати аналізу достовірності СД характеристик учасників веб-спільноти “Львів. Форум Рідного Міста”

На основі результатів програмного комплексу верифікації здійснено класифікацію учасників “Львів. Форум Рідного Міста”, з цих результатів можна зробити висновок, що у кожній досліджуваній веб-спільноті більше ніж третина облікових записів містять інформацію з низькою адекватністю персональних даних.

Висновки. У цій роботі вирішено важливе наукове завдання побудови методів та засобів перевірки достовірності персональних веб-учасників за допомогою комп’ютерно-лінгвістичного аналізу їхніх інформаційного наповнення, та представлено результати практичного впровадження запропонованих методів для перевірки достовірності інформаційного наповнення ВС, зокрема персональних даних, які веб-учасник розмістив у обліковому записі віртуальної спільноти. Програмний засіб “Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника” призначений для верифікації усієї персональної інформації про учасників веб-спільноти, зокрема важливих соціально-демографічних характеристик учасників, що дало змогу реалізувати систему підтримки прийняття рішень для фахівця з управління веб-спільнотами у сфері опрацювання персональних даних. Програмний засіб розроблено з метою автоматизації процесу аналізу масиву користувацького інформаційного наповнення WWW, які апробовано на популярних спільнотах.

Література

1. Peleschyshyn A. Typical ways of Web communities development / A. Peleschyshyn, Yu. Syerov // Proc. of the Intern. Conf. on Computer Science and Information Technologies «CSIT’2006». – Lviv, 2006. – P. 56–58.

2. Сєров Ю. Аналіз комунікативних процесів у Веб-спільнотах середовища Веб 2.0 / Ю. Сєров, А. Пелещишин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2009. – № 1/2 (37). – С. 38–41.

3. Syerov Yu. Software for determination of behavior patterns of web-forum members / Yu. Syerov, R. Kravets // Комп’ютинг. – Тернопіль, 2009. – Т. 8, № 2. – С. 119–125.

4. Сєров Ю. Методи аналізу ефективності Веб-форумів / Ю. Сєров, Р. Кравець, А. Пелещишин // Інформаційні системи та мережі: Вісник НУ ЛП. – 2009. – № 653. – С. 197–206.

5. Пелещишин О. Тематика та релевантність онлайн-спільнот у задачах інтернет-маркетингу / О. Пелещишин, Ю. Сєров // Проблеми економіки та управління: Вісник НУ ЛП. – 2010. – № 684. – С. 151–

156.

6. Korzh R. University's Information Image as a Result of University Web Communities' Activities / A. Peleshchyshyn, Y. Syerov, S. Fedushko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – 512. – P. 115–127.

7. Metzger M. Making sense of credibility on the Web / M. Metzger // Journal of the American Society for Information Science and Technology. – 2007. – 58(13). – P. 2078–2091.

8. Morse J. Verification Strategies for Establishing Reliability and Validity in Qualitative Research / J. Morse, M. Barrett, M. Mayan // Internat. Journal of Qualitative Methods. – 2002. – Vol. 1, Is.2, 1. – P. 1–19.

9. Carmines E. Reliability and validity / E. Carmines, R. Zeller // Sage, 2009. – P. 125–233.

10. Beck C. Ensuring content validity / C. Beck // Journal of Nursing Measurement. – 2001. – № 9. – P. 201–215.

11. Park S. A social network-based inference model for validating customer profile data / S. Park, S. Huh, W. Oh // MIS Quarterly. – 2012. – 36(4). – P. 1217–1237.

12. Rubio D. Objectifying content validity / D. Rubio // Social Work Research. – 2003. – 27 (2). – P. 94–104.

13. Singh R. Video content authentication technique / R. Singh // Multimedia Systems. – 2017. – P. 1–30.

14. Fedushko S. Statistical methods of virtual community users age verification / S. Fedushko, H. Biluschak, Yu. Syerov // International Journal of Mathematics and Computational Science. – Vol. 1. – No. 3. – 2015. – P. 174–182.

15. Fedushko S. Determination of the account personal data adequacy of web-community member / S. Fedushko, Yu. Syerov, A. Peleschyshyn, R. Korzh // International Journal of Computer Science and Business Informatics. – Vol. 15. – No. 1. – 2015. URL: http://ijcsbi.org/index.php/ijcsbi/article/view/506/144

16. Федушко С. Формування системи лінгво-комунікативних індикаторів соціально-демографічних характеристик web-учасників / С. Федушко // Управління розвитком складних систем. – 2014. –18. – С. 112–122.

17. Федушко С. Особливості визначення та опису соціально-демографічних характеристик в соціальних комунікаціях / С. Федушко // Вісник НУЛП: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2011. – 694. – С. 75–85.

18. Пелещишин А. Розроблення алгоритму реєстрації та валідації персональних даних учасників Веб-спільноти / А. Пелещишин, Ю. Сєров, С. Федушко // Вісник НУ ЛП: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2010. – № 686. – С. 238–244.

References

1. Peleschyshyn A. Typical ways of Web communities development / A. Peleschyshyn, Yu. Syerov // Proc. of the Intern. Conf. on Computer Science and Information Technologies «CSIT2006». – Lviv, 2006. – P. 56–58.

2. Sierov Yu. Analiz komunikatyvnykh protsesiv u Veb-spilnotakh seredovyshcha Veb 2.0 / Yu. Sierov, A. Peleshchyshyn // Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – Kharkiv, 2009. – # 1/2 (37). – S. 38–41.

3. Syerov Yu. Software for determination of behavior patterns of web-forum members / Yu. Syerov, R. Kravets // Kompiutynh. – Ternopil, 2009. – T. 8, # 2. – S. 119–125.

4. Sierov Yu. Metody analizu efektyvnosti Veb-forumiv / Yu. Sierov, R. Kravets, A. Peleshchyshyn // Informatsiini systemy ta merezhi: Visnyk NU LP. – 2009. – # 653. – S. 197–206.

5. Peleshchyshyn O. Tematyka ta relevantnist onlain-spilnot u zadachakh internet-marketynhu / O. Peleshchyshyn, Yu. Sierov // Problemy ekonomiky ta upravlinnia: Visnyk NU LP. – 2010. – # 684. – S. 151–156.

6. Korzh R. Universitys Information Image as a Result of University Web Communities Activities / A. Peleshchyshyn, Y. Syerov, S. Fedushko // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – 512. – R. 115–127.

7. Metzger M. Making sense of credibility on the Web / M. Metzger // Journal of the American Society for Information Science and Technology. – 2007. – 58(13). – P. 2078–2091.

8. Morse J. Verification Strategies for Establishing Reliability and Validity in Qualitative Research / J. Morse, M. Barrett, M. Mayan // Internat. Journal of Qualitative Methods. – 2002. – Vol. 1, Is.2, 1. – P. 1–19.

9. Carmines E. Reliability and validity / E. Carmines, R. Zeller // Sage, 2009. – P. 125–233.

10. Beck C. Ensuring content validity / C. Beck // Journal of Nursing Measurement. – 2001. – # 9. – P. 201–215.

11. Park S. A social network-based inference model for validating customer profile data / S. Park, S. Huh, W. Oh // MIS Quarterly. – 2012. – 36(4). – P. 1217–1237.

12. Rubio D. Objectifying content validity / D. Rubio // Social Work Research. – 2003. – 27 (2). – P. 94–104.

13. Singh R. Video content authentication technique / R. Singh // Multimedia Systems. – 2017. – R. 1–30.

14. Fedushko S. Statistical methods of virtual community users age verification / S. Fedushko, H. Biluschak, Yu. Syerov // International Journal of Mathematics and Computational Science. – Vol. 1. – No. 3. – 2015. – P. 174–182.

15. Fedushko S. Determination of the account personal data adequacy of web-community member / S. Fedushko, Yu. Syerov, A. Peleschyshyn, R. Korzh // International Journal of Computer Science and Business Informatics. – Vol. 15. – No. 1. – 2015. URL: http://ijcsbi.org/index.php/ijcsbi/article/view/506/144

16. Fedushko S. Formuvannia systemy linhvo-komunikatyvnykh indykatoriv sotsialno-demohrafichnykh kharakterystyk web-uchasnykiv / S. Fedushko // Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. – 2014. –18. – C. 112–122.

17. Fedushko S. Osoblyvosti vyznachennia ta opysu sotsialno-demohrafichnykh kharakterystyk v sotsialnykh komunikatsiiakh / S. Fedushko // Visnyk NULP: Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii. – 2011. – 694. – C. 75–85.

18. Peleshchyshyn A. Rozroblennia alhorytmu reiestratsii ta validatsii personalnykh danykh uchasnykiv Veb-spilnoty / A. Peleshchyshyn, Yu. Sierov, S. Fedushko // Visnyk NU LP: Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii. – Lviv, 2010. – # 686. – S. 238–244.

Рецензія/Peer review : 06.10.2017 р. Надрукована/Printed :30.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Пелещишин А. М.

УДК 004.912

Р.О. БАГРІЙ
Хмельницький національний університет

СИСТЕМА ВВЕДЕННЯ ТЕКСТУ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕОДНОЗНАЧНОЇ ВІРТУАЛЬНОЇ КЛАВІАТУРИ

У роботі проведено дослідження можливості введення тексту меншою кількістю комунікаційних одиниць для реалізації альтернативної комунікації людей з обмеженими можливостями вербального спілкування. Запропоновано використати віртуальну клавіатуру з неоднозначним вибором, клавіші якої містять згруповані букви алфавіту. Алгоритмічно надано метод усунення неоднозначності вибору, що дозволяє отримати перелік слів, які відповідають послідовності дій користувача. Розглянуто задачу оптимізації розподілу букв українського алфавіту на групи у певному порядку слідування. Досліджено варіанти розподілу для різної кількості груп та різних порядків слідування букв. На основі досліджень сформовано рекомендації щодо розподілу множини букв для різної кількості згрупованих клавіш неоднозначної віртуальної клавіатури.

Ключові слова: альтернативна комунікація, неоднозначна віртуальна клавіатура, розподіл букв.

R.O. BAGRIY
Khmelnytsky National University

TEXT TYPING SYSTEM WITH USING AN AMBIGUOUS VIRTUAL KEYBOARD

The paper focuses on the possibilities of the entering text less communication units for the implementation of alternative communication of people with disabilities verbal communication. It is proposed to use ambiguous virtual keyboard, which contain keys with grouped letters of the alphabet. Algorithmically filed disambiguation method, which allows get a list of words that correspond to a sequence of user actions. The problem of optimizing the distribution of letters Ukrainian alphabet into groups in a specific sequential order. Investigated the problem of optimizing the distribution of letters Ukrainian alphabet into groups in a specific sequential order. Variants of distribution for different number of groups and different orders of letters are investigated. Based on the research, recommendations on the distribution of a set of letters for a different number of grouped keys of an ambiguous virtual keyboard are formed.

Keywords: alternative communication, ambiguous virtual keyboard, distribution of symbol.

Вступ. Концепція додаткової та альтернативної комунікації [1] полягає в наданні людям з обмеженими можливостями спілкування засобів для комунікації із зовнішнім світом. Альтернативна комунікація передбачає підходи, методи та технології для перетворення даних, отриманих за допомогою ААС пристроїв в повноцінну інформацію. Таке перетворення пропонується реалізувати шляхом організації введення тексту меншою кількістю комунікаційних одиниць та створення програмного забезпечення для надання можливості спілкування.

Основна проблема будь-якого засобу ААС полягає малій кількості доступних керуючих сигналів, які необхідно зв’язати з великим набором символів комунікації. Методи вибору дозволяють зв’язати елементи управління з вихідним керуючим сигналом, отриманим від будь-якого ААС-пристрою.

Для реалізації альтернативної комунікації необхідно інтелектуалізувати процес введення текстової інформації для обмеженого числа керуючих сигналів. Прискорення процесу введення тексту можливе за рахунок використання надмірності природної мови, що передбачає використання віртуальної клавіатури, клавіші якої містять згруповані букви алфавіту.

Метою роботи є: дослідження можливості прискореного введення тексту за допомогою віртуальної клавіатури з неоднозначним вибором. Це потребує розв’язання задачі неоднозначного вибору та досліджень з розподілу множини букв алфавіту у певному порядку слідування.

Методи оптимізації введення тексту. Для оптимізації продуктивності введення тексту і зведення до мінімуму взаємодії з користувачем часто використовуються віртуальні клавіатури.

Віртуальна клавіатура – це свого роду програмне забезпечення, яке відображає розкладку клавіатури на екрані пристрою. Така клавіатура є одним з найпростіших механізмів для введення тексту. Віртуальні клавіатури показують більш низьку продуктивність введення, ніж фізичні клавіатури, навіть якщо у користувачів немає фізіологічних відхилень. Основними причинами, які роблять віртуальну клавіатуру повільнішою, ніж їх фізичний аналог, є малий розмір віртуальних клавіш і відсутність тактильного зворотного зв’язку [2].

Кількість символів на клавіші також є важливою особливістю в побудові віртуальних клавіатур. Клавіатури з одним символом на клавіші класифікуються як однозначні, а ті, що мають кілька символів на клавіші класифікуються як неоднозначні клавіатури [3]. Крім неоднозначності, на кожній клавіші може бути розподілена різна кількість символів алфавіту.

Ще одна особливість неоднозначних віртуальних клавіатур – це різна кількість самих клавіш. В звичайних клавіатурах кількість клавіш рівна кількості символів, тоді як в неоднозначних клавіатурах ця кількість може змінюватись. Багато робіт [4] використовують тільки три-чотири клавіші, але ця кількість може збільшуватись в залежності від особливостей керуючих сигналів.

Розподіл символів по клавіатурі визначає порядок відображення символів на віртуальній клавіатурі. Цей розподіл відбувається двома способами: по частоті або логічний [5]. Розподіл символів, що базується на їх частоті, впорядковує символи, враховуючи частоту, з якою кожен символ використовується в даній мові. Частотний розподіл полегшує користувачеві віртуальної клавіатури доступ до найбільш частих символів.

Логічний розподіл символів базується на логіці мови, що використовується на клавіатурі [5]. Одним із прикладів такого підходу є розташування в алфавітному порядку. Клавіатури, які використовують алфавітний розподіл, представляють букви від «а» до «я», що послідовно розподілені по клавіатурі.

Іншим прикладом є розподіл QWERTY. Клавіатури, що використовують розподіл QWERTY, впорядковують букви в послідовності, що прийняті для фізичних клавіатур. Цей підхід полегшує навчання і легкість запам'ятовування для тих, хто вже має досвід роботи на фізичних клавіатурах. Щоб надати людям з обмеженими можливостями спілкування можливість використовувати віртуальну клавіатуру застосовуються різні стратегії взаємодії. Одна з них це використання неоднозначних клавіатур та методів усунення неоднозначності вибору.

Технологія для введення тексту меншою кількістю керувань. Розглянемо технологію для введення інформації меншою кількістю керуючих сигналів. Вона передбачає для введення інформації використання віртуальної клавіатури, що складається зі згрупованих букв українського алфавіту. Технологія передбачає, що одним натисканням буде вибрано не конкретну букву, а набір букв, що залежить від поточної розкладки символів по клавішах (кнопках).

Для того, щоб звести до мінімуму взаємодії між користувачем і віртуальною клавіатурою, запропоновано використати алгоритм усунення неоднозначності, подібний до T9 (TNKey алгоритм), так як цей метод демонструє кращу продуктивність [6], ніж клавіатури, що використовують кілька натискань для остаточного вибору.

Метод усунення неоднозначності вибору дозволяє отримати перелік слів, що відповідають послідовності дій користувача з віртуальною неоднозначною клавіатурою та потребує виконання наступних кроків:

- кодування всіх слів словника (корпусу) для заданого розподілу букв по клавішах;
- отримання коду поточного слова, що відповідає послідовності дій (натискань клавіш) користувача;
- пошук у словнику слова, що відповідає коду.

Для реалізації алгоритму, всі слова корпусу потрібно закодувати для заданого розподілення букв по клавішам клавіатури. Таке кодування не зворотне. Код є набором цифр, які відповідають номеру клавіші, у яких знаходиться кожна буква слова. Декодування зводиться до пошуку у словнику коду (отриманого на вході) та повертанню відповідного цьому коду слова. Алгоритм кодування наведений на рис. 1.

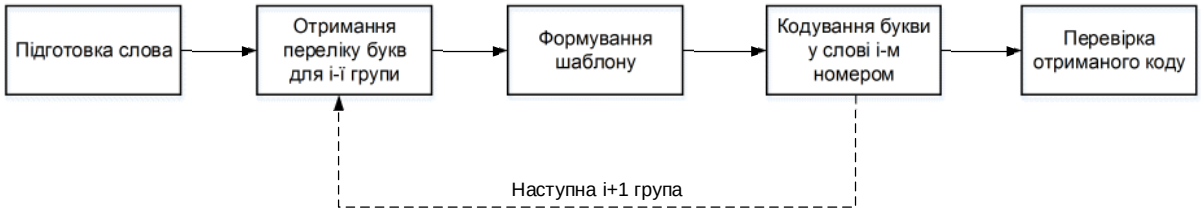


Рис. 1. Алгоритм кодування слова

Приклад кодування слова "болить" для клавіатурного розподілу букв на 6 клавіш наведено на рис. 2:

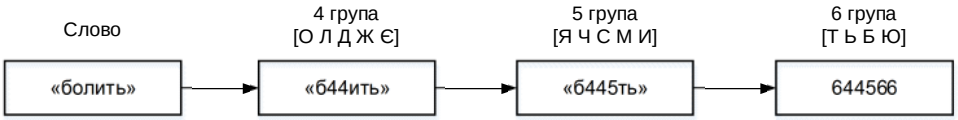


Рис. 2. Приклад кодування слова

У випадку зміни порядку слідування букв, чи зміни кількості клавіш віртуальної клавіатури процедуру кодування потрібно повторити з новими налаштуваннями.

При роботі з неоднозначною віртуальною клавіатурою за одну дію вибирається декілька букв, що належать обраній клавіші. Не принципово, яка саме буква буде обрана з цього переліку, важлива тільки належність її до групи.

На рисунку 3 показана послідовність вибору клавіш користувачем для здійснення набору слова "болить":

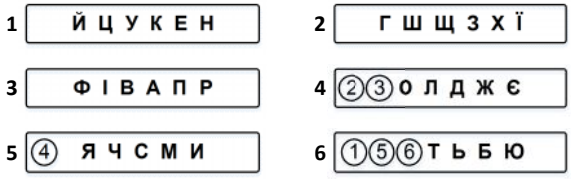


Рис. 3. Послідовність вибору клавіш користувачем

Цифри зліва від прямокутника – номера клавіш, що також є кодом, цифри в кружках – послідовність дії користувача. Після натискання кожної клавіші виконується алгоритм пошуку слів-кандидатів, що відповідають поточному коду. На рис. 4 показано принцип роботи алгоритму при наборі 4-х букв слова.

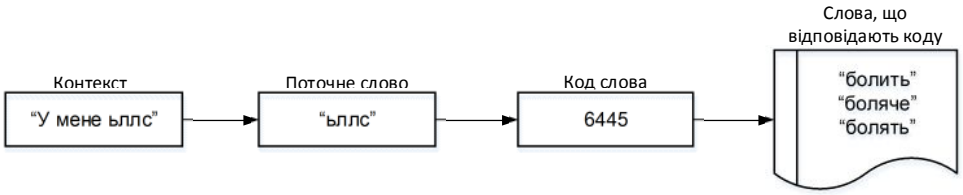


Рис. 4. Принцип роботи алгоритму усунення неоднозначності

Як видно, поточне слова не належить до слів української мови, а відображає тільки послідовність дій. Код, що отримується під час кодування цієї послідовності, порівнюється з внутрішнім словником та формує список відповідних слів.

Зменшення кількості керуючих сигналів дозволить покращити ефективність набору тексту для людей з обмеженими можливостями. Крім того, це розширює перелік альтернативних засобів комунікації, що можуть бути застосовані для генерації керуючих сигналів. У випадку застосування метода вибору скануванням, зменшення кількості клавіш повинно помірно зменшити час пошуку для кожного символу.

Визначення мінімальної кількість клавіш для неоднозначних клавіатур є задачею оптимізації, так як зі зменшенням набору клавіш, кількість букв у них збільшується, що призводить до помилок роботи алгоритму усунення неоднозначності. Так, для клавіатури з 9-а клавішами (стандарт T9), кількість букв, що розташовані на кожній з них, в середньому рівна 4-м. В цьому випадку стандартний алгоритм T9 успішно розв'язує задачу неоднозначності вибору [7]. Зменшення кількості клавіш до 4-х призводить до того, що на кожній клавіші в середньому буде розміщено близько 8-и букв. Це значно ускладнює вибір (підбір) слова, що вводиться користувачем, та потребує застосування додаткових алгоритмів прогнозування та оптимізації розподілення букв по клавішам.

Для реалізації TNKey алгоритму потрібно запропонувати розподіли букв по групам та вказати порядок слідування букв у цих групах. Розподіл букв по групах є задачею оптимізації, тому що від нього залежить кількість слів з однаковим кодом і, як наслідок, швидкість роботи користувача з засобом введення тексту. Для визначення оптимального розподілу потрібно проаналізувати запропоновані порядки слідування букв та визначити критерії, які впливають на кінцевий результат.

Алфавітний та клавіатурний («QWERTY») порядок слідування букв є загальновідомими і тому їх варто дослідити в задачі розподілу на групи клавіш. Для обох цих випадків немає можливості змінювати порядок їх слідування, тому можна провести тільки дослідження з нерівномірним розподілом букв по групах та визначити найкращі варіанти.

Інший підхід – це використати частотний порядок слідування букв (рис. 5). Для української мови є багато літературних джерел, де наведені середньостатистичні частоти повторюваності букв і їх біграми (двобуквені послідовності). В роботі [8] наведені середньостатистичні частоти букв без врахування пропуску між словами на основі аналізу сторінок україномовних сайтів і різних стилів сучасної української мови, в тому числі розмовно-побутової.

Рис. 5. Перелік букв української абетки в порядку зменшення частоти використання

Аналіз середньостатистичних частот повторюваності біграм в українській мові [8] показав, що для неї притаманне чергування голосних та приголосних. Тому для знаходження кращого розподілу слід відокремити голосні та приголосні та сформувати дві частотні послідовності слідування букв – для 10 голосних та 22 приголосних (рис. 6).

Рис. 6. Частотні послідовності слідування голосних та приголосних букв

Визначення кращого варіанту розподілу пропонується оцінювати за сумарною кількістю слів з однаковими кодами. Чим менше буде кількість слів-кандидатів, що відповідають коду, тим точніше будуть працювати методи прогнозування.

Була проведена серія тестів для порівняння наведених порядок слідування букв для різної кількості груп. Для частотних порядків слідування букв, групи були сформовані таким чином, щоб не допускають знаходження в одній групі букв з близькими частотами. В таблиці 1 наведено відносну кількість однакових кодів для різних послідовностей слідування букв.

Таблиця 1

Відсоток слів с однаковим кодом для різних порядків слідування

Послідовність букв	Відсоток слів с однаковим кодом для різних груп, %				
	4	5	6	7	8
алфавітна	29.9	19.2	13.5	10.1	8.4
клавіатурна	26.4	18.0	11.4	8.1	3.6
частотна	19.7	11.3	6.5	3.5	2.4
частотна (2)	19.1	9.6	5.1	3.3	2.1

З проведених досліджень отримано, що частотна послідовність слідування букв з урахуванням голосних/приголосних (частотна 2) дає кращі результати розподілу. Для цієї послідовності різниця з іншими стає найбільш помітною зі збільшенням кількості груп.

Проаналізувавши таблицю можна сформувати рекомендації щодо розподілу множини букв українського алфавіту в певному порядку слідування:

1. Для 8-и груп доцільно використовувати алфавітну послідовність слідування букв (подібне розподілення використовується в мобільних пристроях), так як такий порядок слідування букв є загальновідомим і не потребує багато часу на адаптацію.

2. Для 6-и груп запропоновано клавіатурну послідовність слідування букв, що відповідає стандартному розташуванню рядків та букв, подібно звичайній клавіатурі. Також це розподілення краще прогнозує варіанти слів, за рахунок рознесення найбільш частотних букв, що зосереджені в середині клавіатури, в різні групи.

3. Для 4-х груп доцільніше використовувати частотні послідовності слідування букв. Для інших послідовностей кількість слів з однаковим кодом значно збільшується, і їх використання стає непрактичним.

Використання рекомендованих розподілів букв для українського алфавіту надає більш зручний спосіб введення тексту людям з різним досвідом роботи з цифровими пристроями та забезпечує ефективність набору зі зменшенням елементів управління.

Висновки. В роботі для можливості введення тексту за допомогою віртуальної клавіатури з неоднозначним вибором, алгоритмічно надано метод усунення неоднозначності вибору, який формує перелік слів, що відповідають послідовності дій користувача. Досліджено варіанти розподілу множини букв українського алфавіту на групи у певному порядку слідування. На основі досліджень сформовано рекомендації щодо розподілу множини букв для різної кількості груп. Так, для 4-х згрупованих клавіш віртуальної клавіатури запропоновано використовувати порядок слідування букв, що базується на частоті використання їх у корпусі мови. Для більшої кількості груп, краще підбирати такі варіанти розподілу, до яких буде легше адаптуватися користувачу.

Література

1. Augmentative and Alternative Communication (AAC) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.asha.org/public/speech/disorders/AAC/.
2. Kim J.H. Differences in typing forces, muscle activity, comfort, and typing performance among virtual, notebook, and desktop keyboards / Kim J.H., Aulck L., Bartha M.C., Harper C.A., Johnson P.W. // Applied Ergonomics. 2014; 45(6): 1406–13.
3. Molina A. Evaluation of unambiguous virtual keyboards with character prediction / In: Emiliani P.L., Burzagli L., Como A., Gabbanini F., Salminen // Assistive technology from adapted equipment to inclusive environments. Clifton: IOS Press; 2009. p. 144–153.
4. Miró-Borrás J. Text Entry in the E-Commerce Age: Two Proposals for the Severely Handicapped / Julio Miró-Borrás1, Pablo Bernabeu-Soler // Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. – 2009. – vol 4. – 101–112 p.
5. Joshi A. Design and evaluation of Devanagari virtual keyboards for touch screen mobile phones / Joshi A., Dalvi G., Joshi M., Rashinkar P., Sarangdhar A. // Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services. – 2011. – 323 p.
6. Крак Ю.В. Система ввода текста для альтернативной коммуникации / Ю.В. Крак, А.В. Бармак, Р.А. Багрий // Проблемы управления и информатики. – 2017. – № 3. – С. 5–13.
7. Grover D. L. Patent No. US5818437, Reduced keyboard disambiguating computer / Grover D. L., King M. T., and Kuschler C. A. // Tegic Communications, Inc., Seattle, WA (1998).
8. Сушка С.О. Частоты повторяемости букв и биграмм в открытых текстах на украинском языке [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/1968

References

1. Augmentative and Alternative Communication (AAC) [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.asha.org/public/speech/disorders/AAC/.
2. Kim J.H. Differences in typing forces, muscle activity, comfort, and typing performance among virtual, notebook, and desktop keyboards / Kim J.H., Aulck L., Bartha M.C., Harper C.A., Johnson P.W. // Applied Ergonomics. 2014; 45(6): 1406–13.
3. Molina A. Evaluation of unambiguous virtual keyboards with character prediction / In: Emiliani P.L., Burzagli L., Como A., Gabbanini F., Salminen // Assistive technology from adapted equipment to inclusive environments. Clifton: IOS Press; 2009. p. 144–153.
4. Miró-Borrás J. Text Entry in the E-Commerce Age: Two Proposals for the Severely Handicapped / Julio Miró-Borrás1, Pablo Bernabeu-Soler // Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. – 2009. – vol 4. – 101–112 p.
5. Joshi A. Design and evaluation of Devanagari virtual keyboards for touch screen mobile phones / Joshi A., Dalvi G., Joshi M., Rashinkar P., Sarangdhar A. // Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services. – 2011. – 323 p.
6. Krak Yu.V. Systema vvoda teksta dlia alternatyvnoi kommunykatsyy / Yu.V. Krak, A.V. Barmak, R.A. Bahryi // Problemы upravlenyia y ynformatyky. – 2017. – # 3. – S. 5–13.
7. Grover D. L. Patent No. US5818437, Reduced keyboard disambiguating computer / Grover D. L., King M. T., and Kuschler C. A. // Tegic Communications, Inc., Seattle, WA (1998).
8. Sushka S.O. Chastoty povtoriaemosty bukv y byhramm v otkrytykh tekstakh na ukraynskom yazyke [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/1968

Рецензія/Peer review : 22.09.2017 р. Надрукована/Printed :28.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 681.327.12

М.М. БИКОВ, В.В. КОВТУН, М.С. ФУРМАН
Вінницький національний технічний університет

МЕТОД ПРЕДСТАВЛЕННЯ ОЗНАК У АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЦЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

У статті запропоновано метод екстрагування інформативних ознак для автоматизованої системи розпізнавання мовців критичного застосування з параметрів прихованих шарів глибокої нейронної мережі з bottleneck-шаром, адаптованої до індивідуальних особливостей мовця і акустичного оточення за рахунок використання і-векторів. Також запропоновано алгоритм навчання акустичних моделей на основі глибоких нейромереж з використанням екстрагованих інформативних ознак.

Ключові слова: автоматизована система розпізнавання мовців критичного застосування, розпізнавання образів, кепстральний аналіз, суміш гаусових розподілів, приховані марковскі моделі, глибокі нейромережі.

M.M. Bykov, V.V. KOVTUN, M.S. Furman
Vinnytsia National Technical University

FEATURES REPRESENTATION METHOD FOR THE AUTOMATIC SPEAKER RECOGNITION SYSTEM OF CRITICAL USE

The article suggests a method of informative features extracting for an automatic speaker recognition system of critical use from the parameters of hidden layers of a deep neural network with a bottleneck layer adapted to the individual features of the speaker and acoustic environment due to the use of i-vectors. Also, an algorithm for learning acoustic models based on deep neural networks with the use of extracted informative features is proposed. The authors considered the work of the deep neural network as a complex recognition system, which carries out a cascade of nonlinear transformations of incoming informative features and makes it the implementation of the classification procedure. Theoretical results demonstrate the possibility of using options neurons hidden layer deep neural network trained as independent informative features for recognition classifier with reduced sensitivity to perturbations in the input vectors to the increasing number of hidden layer neural network. The authors also substantiated the approaches to obtaining acoustic models of PMM based on mixtures of Gaussian distributions or on the basis of deep neural networks, the first of which potentially more accurately describes the input signal, and the second is more flexible to those present in the disturbance signal. The efficiency of the theoretical results proposed by the authors is proved experimentally.

Keywords: automatic speaker recognition system of critical use, pattern recognition, cepstral analysis, a Gaussian mixture models, hidden markov models, deep neural networks.

Вступ

Систему автоматизованого розпізнавання мовців критичного застосування [1] в загальному вигляді можна віднести до широкого класу інформаційних систем, основною характеристикою якості яких є надійність, достовірність і безпека. Надійність – властивість системи зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування.

Серед актуальних сучасних систем розпізнавання мовців переважають текстонезалежні системи [2, 3], основані на спільному використанні сумішей гаусових розподілів (Gaussian Mixture Model, СГР) [4–8] та універсальної фонової моделі (Universal Background Model, УФМ) [9]. Основні відмінності систем полягають у застосуванні різних методів зниження розмірності отримуваних інформативних ознак і методів класифікації на основі параметрів СГР-моделей мовців. Ефективність таких систем залежить від тривалості мовних сигналів і є чутливою до акустичного оточення, що робить їх обмежено придатними до використання для створення систем розпізнавання мовця критичного застосування.

Одним з варіантів реалізації стійкішої системи розпізнавання мовців є комбінування можливостей системи незалежного від особливостей мовлення розпізнавання мови і системи розпізнавання мовця, основаної саме на виділенні особливостей мовлення. На етапі навчання такої системи створюється статистична модель мовного сигналу, здатна описувати послідовність звуків парольної фрази, а також особливості їх проголошення конкретним мовцем. Можливість створення такої системи на основі прихованих ПММ підтверджується результатами роботи [10, 11]. В роботі показано, що емісійні розподіли станів ПММ-СГР моделі парольної фрази можна апроксимувати на основі адаптації статистичної моделі голосу мовця, яка навчається класичними методами текстонезалежної ідентифікації [3]. Недоліком таких систем є надзвичайно висока ресурсоємність, адже фактично одночасно повинні працювати дві комплексні системи – розпізнавання мови і розпізнавання мовця, а також чутливістю СГР моделей до присутності у модельованому сигналі завад і суттєвій залежності ПММ до якості розмітки мовного матеріалу. Вирішення цих проблем обмежує активне упровадження відповідних систем розпізнання.

Постановка задачі дослідження

Специфіка використання автоматизованих систем розпізнавання мовців критичного застосування вимагає збереження заданих якісних показників роботи системи не зважаючи на умови використання і акустичне оточення. Існуючий математичний апарат сумішей гаусових розподілів дозоляє описати мовний сигнал із заданою точністю [12], проте не дозволяє достатньо ефективно узагальнити отриманий опис для задачі розпізнавання множини мовців. Існуючий математичний апарат глибоких нейромереж навпаки дозволяє в процесі навчання отримати узагальнені акустичні моделі, втрачаючи при цьому інформацію про індивідуальні особливості мовлення. Синтез методу об’єднання переваг описаних математичних апаратів для застосування у задачі розпізнавання мовця є актуальною задачею, яку розв’язано у представленій статті.

Виділення інформативних ознак із мовного сигналу

Створення комплексних систем розпізнавання образів, до класу яких відноситься і автоматизована система розпізнавання мовця критичного застосування, починається виділенням із запису мовного сигналу (фонограми) інформативних для розпізнавання мовця ознак. Найбільш повно описують мовний сигнал кепстральні коефіцієнти, зокрема, Мел-кепстральні коефіцієнти (Mel-Frequency Cepstral Coefficients, MFCC) [13, 14].

Їх отримання почнемо з фільтрації запису фонограми для її спектрального вирівнювання і пригнічення низькочастотного дрейфу: $y_t = x_t - ax_{t-1}$, де x_t – вхідний сигнал, y_t – сигнал після фільтрації, $a \in 0.9 \div 1$ – коефіцієнт фільтрації (зазвичай дорівнює 0,97). Далі розіб'ємо звукового сигналу на часові відрізки (фрейми) тривалістю 20 мс з постійним кроком 10 мс. Описані далі дії виконуються для кожного фрейму сигналу. Здійснюємо дискретне перетворення Фур'є $Y_k = \sum_{t=0}^{T-1} \omega_t y_t e^{-\frac{2\pi i}{T}kt}$, де T – кількість відліків у фреймі, $k = 0,1,\ldots,T/2$, ω_t – вагова функція, яка призначена для зменшення крайових ефектів, викликаних розбиттям сигналу на фрейми. У системах, пов'язаних із обробленням записів мовних сигналів, зазвичай використовується вагова функція Хеммінга $\omega_t^{hamm} = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi t}{T-1}\right)$, $t = 0,1,\ldots,T-1$. Створимо множину трикутних фільтрів, рівномірно розташованих за Мел-шкалою. Перетворення частот за Мел-шкалою здійснюється за відношенням $B(f) = 1125\ln\left(1 + \frac{f}{700}\right)$, а зворотне перетворення – за формулою $B^{-1}(b) = 700\left(e^{\frac{b}{1125}} - 1\right)$. Для $m = 0,1,\ldots,M-1$ трикутних фільтрів $H_m(k)$ опишемо як

$$H_m(k) = \begin{cases} 0, & k < f(m-1), k > f(m+1), \\ \frac{k - f(m-1)}{f(m) - f(m-1)}, & f(m-1) \le k \le f(m), \\ \frac{f(m+1) - k}{f(m-1) - f(m)}, & f(m) \le k \le f(m+1), \end{cases}$$

де $f(m-1)$, $f(m)$ і $f(m+1)$ – початок, середина і кінець трикутного вікна m-го фільтра, так що $f(m) = \frac{T}{F_s} B^{-1}\left(B(f_{low}) + (m+1)\frac{B(f_{high}) - B(f_{low})}{M+1}\right)$, де f_{low} і f_{high} – нижня і верхня межі аналізованого частотного діапазону, F_s – частота дискретизації сигналу. Далі обчислимо логарифм енергії спектра для згенерованої множини трикутних фільтрів $E_m = \ln\left(\sum_{k=0}^{T/2} |Y_k|^2 H_m(k)\right)$, $m = 0,1,\ldots,M-1$, і виконаємо дискретне косинусне перетворення для обчисленого логарифму енергії E_m:

$$c_n = \sum_{m=0}^{M-1} E_m \cos\left(\frac{\pi(m+0.5)n}{M}\right), \; n = 0,1,\ldots,M, \tag{1}$$

Вектор c_n містить множину кепстральних коефіцієнтів. Для опису мовного сигналу зазвичай використовують перші 10–15 з них. Для моделювання динаміки мовного сигналу вектор c_n доповнимо векторами перших d_n і других a_n похідних відповідно:

$$d_n = \frac{\sum_{l=1}^{L} l(c_{n+l} - c_{n-l})}{2\sum_{l=1}^{L} l^2}, \quad a_n = \frac{\sum_{l=1}^{L} l(d_{n+l} - d_{n-l})}{2\sum_{l=1}^{L} l^2}. \tag{2}$$

Формування ПММ-СГР моделі для автоматизованої системи розпізнавання мовця критичного застосування

Врахуємо варіативність мовного сигналу в часовому просторі у створюваній системі застосувавши приховані марковські моделі, для чого визначимося із кількістю станів моделі N, множиною станів $S = \{S_1, S_2, \ldots, S_N\}$ (стан моделі у момент часу t позначатимемо q_t), множиною значень, що спостерігаються, які можуть породжуватися моделлю (спостереження в момент часу t позначатимемо o_t), розподілом імовірностей переходів між станами $A = \{a_{ij} = P(q_t = S_j | q_{t-1} = S_i)\}$, $i, j = 1,2,\ldots,N$, розподілом

імовірностей спостережень у стані S_j $P\left(o_t \middle| S_j\right)$, $j=1,2,\ldots,N$ і початковим розподілом імовірностей станів $\pi=\{\pi_i=P(q_1=S_i)\}$, $i=1,2,\ldots,N$.

У задачі розпізнавання мовця стани ПММ найчастіше моделюють фонеми парольної фрази (зазвичай 3 стани на фонему), під спостереженням йдеться про вектор інформативних ознак, а для з'ясування наскільки добре стан марковської моделі описує поточний фрейм мовного сигналу (імовірність емісії) застосуємо моделі гаусових сумішей. В цьому випадку, щільність розподілу імовірностей емісії задається сумішшю гаусових розподілів

$$b_i(o_t)=\sum_{m=1}^{M}\frac{c_{i,m}}{(2\pi)^{D/2}\left|\Sigma_{i,m}\right|^{1/2}}e^{-\frac{1}{2}(o_t-\mu_{i,m})^T\Sigma_{i,m}^{-1}(o_t-\mu_{i,m})}, \tag{3}$$

де набір параметрів b_i включає значення ваг суміші $c_{i,m}$, вектори математичних очікувань гаусіан $\mu_{i,m}$ і коваріаційні матриці гаусіан $\Sigma_{i,m}$.

Нехай $q_1^T=(q_1,q_2,\ldots,q_T)$ – послідовність станів СГР-ПММ, $o_1^T=(o_1,o_2,\ldots,o_T)$ – послідовність спостережень. Імовірність породження СГР-ПММ послідовності спостережень o_1^T для послідовності станів q_1^T визначається як

$$P\left(o_1^T \middle| q_1^T\right)=\prod_{t=1}^{T}b_{q_t}(o_t)=\prod_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\frac{c_{q_t,m}}{(2\pi)^{D/2}\left|\Sigma_{q_t,m}\right|^{1/2}}e^{-\frac{1}{2}(o_t-\mu_{q_t,m})^T\Sigma_{q_t,m}^{-1}(o_t-\mu_{q_t,m})}. \tag{4}$$

Імовірність появи послідовності станів q_1^T є добутком імовірностей переходів між станами ПММ, тобто

$$P\left(q_1^T\right)=\pi_{q_1}\prod_{t=1}^{T-1}a_{q_tq_{t+1}}. \tag{5}$$

Тоді спільну імовірність появи послідовності спостережень o_1^T і послідовності станів o_1^T моделі представимо добутком імовірностей (4) і (5):

$$P\left(o_1^T,q_1^T\right)=P\left(o_1^T,q_1^T\right)P\left(q_1^T\right) \tag{6}$$

Повна імовірність появи послідовності спостережень o_1^T для даної моделі опишемо як

$$P\left(o_1^T\right)=\sum_{q_1^T}P\left(o_1^T,q_1^T\right). \tag{7}$$

Імовірність (7) можна обчислити за алгоритмом прямо-зворотного ходу [15] за час, пропорційний T. Далі здійснюватимемо навчання СГР-ПММ із врахуванням критерію максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood) [16], налаштовуючи параметри моделі по заданій послідовності спостережень так, щоб збільшити імовірність появи цієї послідовності спостережень для модифікованої моделі. Таке навчання можна здійснити, наприклад, ЕМ-алгоритмом. При достатній кількості параметрів моделі гаусових сумішей описують розподіл імовірностей із необхідною точністю.

Застосування глибокої нейромережі для утворення акустичної моделі мовця

Глибокі нейромережі (Deep Neural Network) [17,18] також дозволяють обчислити імовірності емісій (3). Глибокою нейромережею називають штучну нейромережу із двома або більше прихованими шарами. Нехай є глибока нейромережа із $L+1$ шарами. Позначимо вхідний шар як o, в вихідний шар як L. Для вхідного і прихованих шарів виконується залежність

$$v^l=f\left(z^l\right)=f\left(W^lv^{l-1}+b^l\right),\ 0<l<L, \tag{8}$$

де $W^lv^{l-1}+b^l\in R^{N_l}$, $v^l\in R^{N_l}$, $W_l\in R^{N_l\times N_{l-1}}$, $b^l\in R^{N_l}$ і $N_l\in R$ – відповідно, вектор індукованого локального поля, вектор активації, матриця ваг, вектор зміщення і кількість нейронів шару l; $v^0=o$ – вектор спостереження, або вектор ознак, $N_0=D$ – розмірність вектора ознак; $f(\ldots)$ – функція активації, яка поелементно застосовується до вектору індукованого локального поля. Зазвичай функція активації є сигмоїдною $\left(\sigma(z)=\frac{1}{1+e^{-z}}\right)$. Для задач класифікації кожен вихідний нейрон відповідає за $i\in\{1,2,\ldots,C\}$ класів, де $C=N_L$ – кількість класів. Значення i-го вихідного нейрона обчислюється за формулою

$$v_i^L = P_{DNN}(i|0) = soft\max_i\left(z^L\right) = \frac{e^{z_i^L}}{\sum_{j=1}^{C} e^{z_j^L}} \quad (9)$$

і інтерпретується як імовірність того, що спостереження o належіть класу i.

Подавши на вхід ГНМ вектор спостережень o, можна обчислити значення на виході ГНМ, врахувавши множину параметрів $\Theta = \{W, b\} = \{W^l, b^l | 0 < l \le L\}$, описану у рівнянні (8), для послідовного обчислення векторів активації шарів з 1 по $L-1$ включно, і за допомогою рівняння (9) використати отриманні значення для задач класифікації. Навчатимемо нейромережу налаштовуючи параметри $\Theta = \{W, b\}$ за наявними навчальними даними $S = \{(o^m, y^m) 0 \le m < M\}$, де M – кількість наборів даних, o^m і y^m – вектори спостережень і бажаний вихідний вектор для m-го набору вхідних даних. У нашій задачі вектор y є розподілом імовірностей акустичних класів і для оцінювання якості роботи нейромережі доцільним є застосування критерію мінімізації взаємної ентропії (Cross-Entropy, CE)

$$J_{CE}(W, b, S) = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} J_{CE}\left(W, b; o^m, y^m\right), \quad (10)$$

де $J_{CE}(W, b; o, y) = -\sum_{i=1}^{C} y_i \log v_i^L$, а $y_i = P_{emp}(i|o)$ є емпіричною імовірністю того, що спостереження o належить класу i, а v_i^L – ця ж імовірність, обчислена ГНМ.

Результати досліджень [18] дозволяють стверджувати, що комбінація прихованих шарів глибокої нейромережі може виконувати функцію вилучення інформативних ознак із вхідних даних. Приховані шари ГНМ реалізують композицію простих нелінійних перетворень вхідних даних, що дозволяє утворювати комплексні закономірності, а вихідний softmax-шар виконує функції простої логлінійної класифікації. Тоді, для випадку моделювання акустичних даних, глибока нейромережа виконує двоетапний процес обчислення апостеріорної імовірності $P(s|x)$. На першому етапі вхідний вектор ознак x трансформується у вектор v^{L-1} шляхом $L-1$ нелінійних перетворень, здійснюваних $L-1$ прихованими шарами глибокої нейромережі. На другому етапі відбувається обчислення апостеріорної імовірності $P\left(s\middle|v^{L-1}\right)$ із використанням логлінейної моделі. Отже, приховані шари глибокої нейромережі екстрагують із вхідних ознак внутрішні закономірності, які ефективно класифікуються логлінейною моделлю на вихідному шарі, а процеси навчання класифікатора і екстрагування ознак відбуваються одночасно.

Нехай на вхідний шар ГНМ подано вектор ознак $x = v^0$, до якого додано збурення δ^0. Тоді поріг активації $v^l = \sigma\left(W^l v^{l-1} + b^l\right)$ для l-го $(l = 1, 2, \ldots, L-1)$ прихованого шару зміниться на величину $\delta^l = \sigma\left(W^l\left(v^{l-1} + \delta^{l-1}\right) + b^l\right) - \sigma\left(W^l v^{l-1} + b^l\right) \approx diag\left(\sigma'\left(W^l v^{l-1} + b^l\right)\right)\left(W^l\right)^T \delta^{l-1}$, де $\sigma(z)$ – вектор, кожна компонента якого це сигмоїда від відповідної компоненти вектора z, $diag(z)$ – діагональна матриця, на діагоналі якої розташовані компоненти вектора z. Продовжуючи перетворення отримаємо $\sigma'\left(W^l v^{l-1} + b^l\right) = \sigma\left(W^l v^{l-1} + b^l\right) \circ \left(1 - \sigma\left(W^l v^{l-1} + b^l\right)\right) = v^l \circ \left(1 - v^l\right)$, де символом $\circ$ позначено операцію поелементного добутку векторів. Отже, збурення δ^l можна оцінити як

$$\left\|\delta^l\right\| \approx \left\|diag\left(\sigma'\left(W^l v^{l-1} + b^l\right)\right)\left(W^l\right)^T \delta^{l-1}\right\| \le \left\|diag\left(\sigma'\left(W^l v^{l-1} + b^l\right)\right)\left(W^l\right)^T\right\| \left\|\delta^{l-1}\right\| = \left\|diag\left(v^l \circ \left(1 - v^l\right)\right)\left(W^l\right)^T\right\| \left\|\delta^{l-1}\right\| \quad (11)$$

З виразу (11) випливає, що мале збурення у вхідних даних буде зменшуватися з кожним прихованим шаром. Отже, внутрішні закономірності, які екстрагуються прихованими шарами глибокої нейромережі з вхідних даних, стають менш чутливими до збурень у вхідних даних із зростанням кількості прихованих шарів. Отже, на прихованих шарах глибокої нейромережі, близьких до вхідного шару, екстрагуються низькорівневі ознаки, які презентують локальні шаблони, чутливі до незначних змін вхідних ознак. Відповідно, ознаки, які екстрагуються на прихованих шарах глибокої нейромережі, близьких до вихідного шару, носять більш абстрактний характер і стають інваріантними до змін вхідних ознак, зо робить ці ознаки менш цікавими для задачі розпізнавання мовця. Проте, слід також встановити поріг величини збурень вхідних даних, перевищивши який глибока нейромережа вже не зможе коректно інтерпретувати вхідні дані.

Метод екстрагування ознак глибокої нейромережею із урахуванням ПММ-СГР акустичної моделі

Враховуючи вище сказане, є можливість використати як інформативні ознаки для навчання акустичної моделі вектори активацій одного з прихованих або вихідного шарів глибокої нейромережі. Наприклад, перетворені відповідним способом імовірності фонем, які утворюються вихідним шаром

нейромережі з одним прихованим шаром, можна застосувати як вектор ознак для навчання СГР-ПММ акустичної моделі, але отриманий таким чином вектор параметрів буде дуже великої розмірність. Зробити отримуваний вектор параметрів компактнішим можна увівши до архітектури глибокої нейромережі bottleneck-шар [17] – прихований шар із невеликою кількістю нейронів із, зазвичай, лінійними функціями активації, який розташовується між прихованими шарами глибокої нейромережі. Параметри нейронів bottleneck-шару можна об'єднати із традиційними ознаками (наприклад, кепстральними коефіцієнтами) і, застосувавши до утвореного вектору параметрів відомі процедури компактифікації даних (наприклад, сингулярний розклад (Singular Values Decomposition, SVD) [1]), використати отриманий компактний вектор параметрів для точнішого навчання СГР-ПММ акустичних моделей. Автори припускають, що параметри bottleneck-шару глибокої нейромережі, які забезпечили отримання оптимальної СГР-ПММ акустичної моделі мовлення, будуть інформативні для і для задачі розпізнавання мовців. Причому ефективність bottleneck-ознак можна варіювати деталізуючи СГР-ПММ акустичну модель. На основі вищенаведених міркувати синтезовано послідовність операцій для виділення інформативних ознак з bottleneck-шару глибокої нейромережі для задачі розпізнавання мовців:

1. Виділення кепстральних коефіцієнтів (1)–(2) для навчання СГР-ПММ моделі.
2. Навчання СГР-ПММ моделі (3).
3. Вибір ознак для навчання глибокої нейромережі (ці ознаки можуть відрізнятися від використаних для навчання СГР-ПММ моделі) і приведення вхідних даних для навчання глибокої нейронної мережі до нульового середнього і одиничної дисперсії.
4. Ініціалізація навчання глибокої нейромережі із L прихованими шарами за критерієм мінімізації взаємної ентропії (10).
5. Створення *i*-векторів для навчальної бази мовців і приведення *i*-векторів до нульового середнього і одиничної дисперсії.
6. Розширення вхідного шару навченої на етапі 4 глибокої нейромережі з ініціалізацією відповідних коефіцієнтів матриці ваг нульовими значеннями.
7. Донавчання глибокої нейромережі з розширеним вхідним шаром за ознаками, до яких на кожному фреймі додано *i*-вектор, який відповідає цьому фрейму фонограми. При цьому у цільову функцію введено доданок $R(W)$, який штрафує відхилення ваг W^l моделі, що навчається, від значень ваг $\tilde{W}^l$ вихідної моделі:

$$R(W) = \lambda \sum_{l=1}^{L+1} \left\| vec\left(W^l - \tilde{W}^l\right) \right\|^2 = \lambda \sum_{l=1}^{L+1} \sum_{i=1}^{N_l} \sum_{j=1}^{N_{l-1}} \left(W_{ij}^{\ l} - \tilde{W}_{ij}^{\ l}\right)^2, \quad (12)$$

де $vec(W)$ – вектор, отриманий злиттям всіх стовпців матриці W, λ – величина штрафу.

1. Розбиття обраного прихованого шару l глибокої нейромережі на два шари за правилом $v^l = f\left(W^l v^{l-1} + b^l\right) \approx f\left(W_{out}^l \left(W_{bn}^l v^{l-1} + 0\right) + b^l\right)$. В результаті отримаємо перший шар – шар із лінійною функцією активації, матрицею ваг W_{bn}^l і нульовим вектором зсувів, і другий шар – нелінійний шар з матрицею ваг W_{out}^l і вектором зсувів b^l, із розмірністю вихідного шару. Для розбиття застосуємо сингулярний розклад матриці ваг $W^l = USV^T \approx \tilde{U}_{bn}\tilde{V}_{bn}^T = W_{out}^l W_{bn}^l$, де індекс bn означає знижену розмірність. Отже, вихідна глибока нейромережа із L прихованими шарами перетворюється на глибоку нейромережу із $L+1$ прихованими шарами та лінійним bottleneck-шаром l.
2. Донавчання глибокої нейромережі із bottleneck-шаром із штрафом (11) на відхилення ваг від ваг вихідної моделі.
3. Відкидання шарів глибокої нейромережі, що слідують за bottleneck-шаром.
4. Використання отриманої нейронної мережі із вихідним bottleneck-шаром для формування інформативних ознак.

I-вектор, введений з п.5 алгоритму, призначений для персоналізації СГР-ПММ акустичної моделі для можливості її використання у задачі розпізнавання мовця. Вектор акустичних ознак x_t утворюється з моделі гаусових сумішей з діагональними коваріаційними матрицями, названої універсальною фонової моделлю (Universal Background Model, УФМ), яка навчається за великим обсягом фонограм: $x_t \sim \sum_{k=1}^{K} c_k N(\cdot; \mu_k(0); \Sigma_k)$. Вектор акустичних ознак $x_t(s)$, що належить мовцю s, утворюється із адаптований до цього мовця моделі гаусових сумішей $x_t(s) \sim \sum_{k=1}^{K} c_k N(\cdot; \mu_k(s); \Sigma_k)$. Отже, індивідуальний для мовця s *i*-вектор $w(s)$ визначається із лінійної залежності $\mu_k(s) = \mu_k(0) + T_k w(s)$ між залежними від мовця математичними очікуваннями $\mu_k(s)$ і незалежними від мовця математичними очікуваннями $\mu_k(0)$. Таким чином, *i*-вектор кодує відмінність щільності розподілу імовірностей акустичних ознак, оціненої за фонограмою, від еталонної. Додавання до вектора акустичних ознак *i*-вектора, обчисленого за фрагментом

фонограми, що відповідає певному мовцю, забезпечує адаптацію СГР-ПММ акустичної моделі до індивідуальних особливостей мовця і акустичного оточення.

Інтерпретація результатів роботи глибокої нейромережі

Отримані на основі ПММ-ГНМ моделювання імовірності необхідно інтерпретувати в контексті призначення автоматизованої системи розпізнавання мовців критичного застосування. Для цього необхідно сформулювати вирішальне правило, яке на основі імовірностей, генерованих акустичними моделями та універсальними фоновими моделями, видаватиме номер мовця, якому належить фонограма із записом парольної фрази $\hat{\omega}$. Правило сформулюємо так:

$$\hat{\omega} = \arg\max_{\omega} P(\omega|x) = \arg\max_{\omega} \frac{P(x|\omega)P(\omega)}{P(x)} = \arg\max_{\omega} P(x|\omega)P(\omega), \quad (12)$$

де максимум береться по всіх можливим ланцюжкам слів парольної фрази ω, а $x = (x_1, x_2, \ldots, x_T)$ є набором векторів ознак сигналу, що використовується для розпізнавання СГР-ПММ системою, або набір векторів комплексних ознак для ГНМ-ПММ систем. Імовірність $P(\omega)$ є еталонною імовірністю спостереження ланцюжка слів парольної фрази ω, а імовірність $P(x|\omega) = \sum_q P(x|q,\omega)P(q|\omega) \approx \max_{q|\omega} \pi(q_0) \prod_{t=1}^{T} a_{q_{t-1}q_t} \prod_{t=0}^{T} P(x_t|q_t)$ генерується акустичної моделлю. Для пошуку максимально правдоподібною послідовності станів прихованої марковської моделі використовується алгоритм Вітербі [3]. Відзначимо, що у ГНМ-ПММ системі глибока нейромережа видає апостеріорну імовірність $P(q_t|x_t)$, тоді як нам необхідна імовірність $P(x_t|q_t)$. Але її можна отримати скориставшись теоремою Байєса [17]: $P(x_t|q_t) = \frac{P(q_t|x_t)P(x_t)}{P(q_t)}$, де імовірністю $P(x_t)$ в контексті задачі розпізнавання мовця можна знехтувати тому, що ця імовірність не залежить від послідовності слів у парольній фразі ω, а $P(q_t)$ – апріорна імовірність спостереження q_t, яку обрахуємо із навчальних даних $P(q_t) = N_{q_t}/N$, де N_{q_t} – кількість фреймів, що містять парольну фразу, N – всі фрейми навчальних даних.

Для балансування імовірностей, генерованих акустичними і універсальними фоновими моделями, використаємо ваговий коефіцієнт λ, тоді правило (12) виглядатиме як $\hat{\omega} = \arg\max_{\omega}\left(\ln P(x|\omega) + \lambda \ln P(\omega) - \omega_{penalty} n(\omega)\right)$, де ω_{penalty} – штраф за розпізнавання нового слова (щоб уникнути розбиття довгих слів на велику кількість коротких), $n(\omega)$ – кількість слів у ланцюжку ω.

Отже, на основі вищенаведених теоретичних результатів авторами синтезовано автоматизовану систему розпізнавання мовця критичного застосування на основі

Планування експерименту та аналіз результатів

Для емпіричного оцінювання ефективності отриманих теоретичних результатів авторами здійснено програмну реалізацію запропонованих алгоритмів у вигляді текстозалежної автоматизованої системи розпізнавання мовця критичного застосування із реалізацію вище запропонованого ПММ-ГНМ підходу до отримання акустичних моделей мовців.

В якості бази еталонних записів, які піддавалися на вхід створеної системи, використано записи із безкоштовної бази даних NOIZEUS – спеціалізованої бази даних Школи інжинірингу та комп'ютерних наук Еріка Джонсона при Університеті Техасу в Далласі, США, яка використовується для дослідження алгоритмів покращення звуку і складається з 30 речень англійської розмовної мови, вимовлених трьома чоловіками та трьома жінками (по 5 на кожного диктора, частота дискретизації записів складає 25 кГц, але задля додавання шуму була зменшена до 8 кГц) та записів типових побутових та техногенних шумів. В ході експерименту автоматизовану систему розпізнавання мовців критичного застосування навчали як записами чистих парольних фраз, так і парольними фразами із додаванням шумів. В першому випадку навчальна вибірка містила 18 парольних фраз, у другому – 576, де до чистого сигналу додавався штучний шум з рівнями шум/сигнал 0 дБ, 5 дБ, 10 дБ, 15 дБ відповідно. Для навчання моделей використано 60% обсягу бази аудіозаписів, в яку увійшли екземпляри записів без шумів та із різним рівнем шум/сигнал (5, 10, 15 дБ) відповідно. Тестувальна вибірка склала решту 40% аудіозаписів. Ідентифікація мовця вважалася вірною якщо модель і фонограма із парольною фразою належали одному мовцеві і розпізнаний системою лінгвістичний вміст парольної фрази збігалася із еталонним. Проведено дві етапи досліджень: перший етап передбачав оцінювання імовірності правильного розпізнавання мовців за індивідуальними особливостями мовлення із сталою структурою парольної фрази для всіх мовців, але із варіювання рівнем шумів у фонограмах, другий етап досліджень передбачав варіювання структури парольної фрази без зміни акустичного середовища.

В якості базової для експериментів взято глибоку нейромережу *dnn_b* із 6 прихованими шарами по 2048 нейронів із сигмоїдними функціями активації, яку навчено на 36-мірних ознаках, отриманих з базової СГР-ПММ моделі *gmm_b* з [12], взятих з 11 фреймів фонограм (центральний фрейм і по 5 фреймів зліва і справа відносно центрального). Адаптована модель глибокої нейромережі *dnn_a* навчено на вхідних ознаках

базової моделі, доповнених *i*-вектором, зі штрафом 10^{-8} на відхилення ваг від значень базової моделі. I-вектори довжиною 100 значень отримано для навчальних і тестових записів на основі УФМ із 512 гаусіанами, яку навчено на 12-мірних MFCC-ознаках (1), доповнених першими і другими похідними (2). У адаптовану модель глибокої нейромережі із застосуванням сингулярного розкладу матриці ваг 3-го прихованого шару додано лінійний шар з 80 нейронів. Отримана в результаті bottleneck-нейромережа використовувалася для ініціалізації навчання моделі *dnn_a +*. Навчання проводилося зі штрафом 10^{-8} на відхилення ваг від значень нейронної мережі *dnn_a*. Ця глибока нейромережа після видалення шарів, наступних за bottleneck-шаром, використовувалася для побудови 80-мірних оптимізованих ознак. На оптимізованих ознаках навчено СГР-ПММ модель *gmm_o* з тією ж кількістю гаусіан і зв'язаних станів, що і в базової моделі *gmm_b*. Також оптимізовані ознаки, отримані з 31 фрейму, проріджених через 5 фреймів (тобто [-15 -10 -5 0 5 10 15], де 0 – центральний фрейм), використані для навчання ГНМ-ПММ моделі *dnn_o* з 4 прихованими шарами по 2048 нейронів ss сигмоїдними функціями активації та ініціалізацією навчання із застосуванням обмежених машин Больцмана [17].

Результати тестування створених моделей для двох запланованих етапів експериментів наведено на рис. 1.

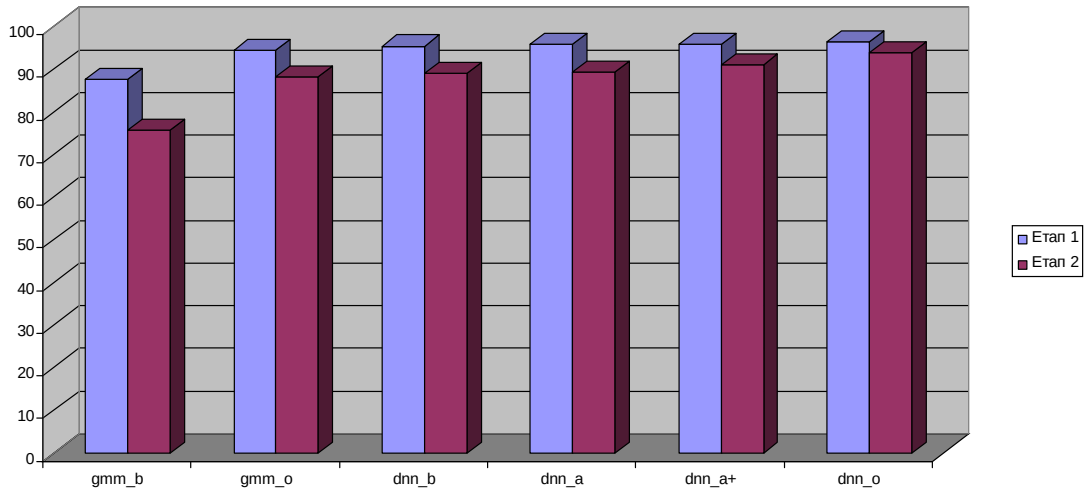


Рис. 1. Залежність імовірності правильного розпізнавання мовців автоматизованою системою розпізнавання мовців критичного застосування від обраної акустичної моделі для 1 та етапів досліджень

Висновки

В даній роботі автори поглибили інтеграцію математичного апарату сумішей гаусових розподілів для використання у системах розпізнавання мовців критичного застосування інтегрувавши його із математичним апаратом прихованих марковських моделей, що дозволило використати для розпізнавання особи мовця не лише фізіологічні особливості мовлення, які моделювалися СГР, а і лінгвістичну інформацію, описувану ПММ. Також авторами обґрунтовано підходи до отримання акустичних моделей ПММ на основі сумішей гаусових розподілів або на основі глибоких нейромереж, перший з яких потенційно точніше описує вхідний сигнал, а другий гнучкіший до присутніх у сигналі збурень.

Автори розглянули роботу глибокої нейромережі як комплексної системи розпізнавання, яка здійснює каскад нелінійних перетворень вхідних інформативних ознак і звершує його здійсненням процедури класифікації. Отримано теоретичні результати, які доводять можливість використання параметрів нейронів прихованих шарів навченої глибокої нейромережі як самостійних інформативних ознак для розпізнавання зі зниженням чутливості класифікатора до збурень у вхідному векторів зі зростанням кількості прихованих шарів нейромережі.

Для зменшення розмірності отриманих із прихованих шарів глибокої нейромережі інформативних ознак із збереженням їх ефективності запропоновано здійснювати перетворення архітектури глибокої нейромережі із застосуванням bottleneck-шару, параметри якого отримуються із застосуванням сингулярного розподілу.

Розроблено метод екстрагування інформативних ознак з параметрів прихованих шарів глибокої нейронної мережі з bottleneck-шаром, адаптованої до індивідуальних особливостей мовця і акустичного оточення за рахунок використання *i*-векторів. Також запропоновано алгоритм навчання акустичних моделей на основі глибоких нейромереж з використанням екстрагованих інформативних ознак. Ефективність запропонованих авторами теоретичних результатів доведено експериментально.

Література

1. Ковтун В.В. Оцінювання надійності автоматизованих систем розпізнавання мовців критичного застосування / М.М. Биков, В.В. Ковтун // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 2. – С. 70–76.

2. Брагина Е.К. Современные методы биометрической аутентификации: обзор, анализ и определение перспектив развития / Е. К. Брагина, С. С. Соколов // Вестник АГТУ. – 2016. – № 61. – С. 40–45.

3. Матвеев Ю.Н. Технологии биометрической идентификации личности по голосу и другим

модальностям / Ю.Н. Матвеев // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. „Приборостроение“. – 2012. – № 3(3). – С. 46–61.

4. A short tutorial on Gaussian Mixture Models [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.computerrobotvision.org/2010/tutorial_day/GMM_said_crv10_tutorial.pdf.

5. Kenny P., Boulianne G., Ouellet P., Dumouchel P. Speaker and Session Variability in GMM-Based Speaker Verification // IEEE Transact. on Audio, Speech, and Language Processing. 2007. Vol. 15, N 4. P. 1448–1460.

6. Vogt R. J., Lustri C. J., Sridharan S. Factor Analysis Modelling for Speaker Verification with Short Utterances // Proc. Of Speaker and Language Recognition Workshop “Odyssey-2008”. Stellenbosch, South Africa, 2008. P. 1–5.

7. Kanagasundaram A., Vogt R., Dean D.B., Sridharan S., Mason M. W. I-vector based speaker recognition on short utterances // Proc. of 12th Annual Conf. of International Speech Communication Association (INTERSPEECH 2011). Firenze Fiera, Florence, 2011. P. 2341–2344.

8. Kanagasundaram A., Vogt R.J., Dean D. B., Sridharan S. PLDA based speaker recognition on short utterances // Proc. of Speaker and Language Recognition Workshop “Odyssey-2012”. Singapore, 2012. P. 28–33.

9. Larcher A.O., Bonastre J.-F., Mason J. S. D. From GMM to HMM for embedded password-based speaker recognition // Proc. 16th Europ. Signal Processing Conf. (EUSIPCO-2008). Lausanne, Switzerland, 2008. P. 1–5.

10. Juang B. H., Rabiner L. R. Hidden Markov Models for Speech Recognition // Technometrics. 1991. Vol. 33, № 3. P. 251–272.

11. Subramanya A., Zhengyou Z., Surendran A. C., Nguyen P., Narasimhan M., Acero A. A Generative-Discriminative Framework using Ensemble Methods for Text-Dependent Speaker Verification // Proc. of the Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-2007). Honolulu, Hawaii, USA, 2007. Vol. 4. P. 225–228.

12. Ковтун В.В. Використання множини мікрофонів у автоматизованій системі розпізнавання мовця критичного застосування / М.М. Биков, В.В. Ковтун // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 3. – С. 67–73.

13. Paliwal K.K., Atal B.S. Frequency related representation of speech // Proc. EUROSPEECH, pp. 65–68 Sep. (2003).

14. Fukuda T., Takigawa M., Nitta T. Peripheral features for HMMbased speech recognition // Proc. ICASSP, 1: pp. 129–132 (2001).

15. Baum L. Statistical inference for probabilistic functions of finite state Markov chains / L. Baum, T. Petrie // Ann. Math. Statist. – 1966. – Vol. 37, no. 6. – P. 1554–1563.

16. Dempster A. Maximum-likelihood from incomplete data via the EM algorithm / A. Dempster, N. Laird, D. Rubin // J. Roy. Stat. Soc. Ser. B. – 1977. – Vol. 39, no. 1. – P. 1–38.

17. Grézl F. Adaptation of multilingual stacked bottle-neck neural network structure for new language / F. Grézl, M. Karafiát, K. Veselý // Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2014. – P. 7654–7658.

References

1. Kovtun V.V. Otsiniuvannia nadiinosti avtomatyzovanykh system rozpiznavannia movtsiv krytychnoho zastosuvannia / M.M. Bykov, V.V. Kovtun // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2017. – № 2. – S. 70–76.

2. Brahyna E.K. Sovremennye metody byometrycheskoi autentyfykatsyy: obzor, analyz y opredelenye perspektyv razvytyia / E. K. Brahyna, S. S. Sokolov // Vestnyk AHTU. – 2016. – № 61. – C. 40–45.

3. Matveev Yu.N. Tekhnolohyy byometrycheskoi ydentyfykatsyy lychnosty po holosu y druhym modalnostiam / Yu.N. Matveev // Vestn. MHTU ym. N. E. Baumana. Ser. „Pryborostroenye“. – 2012. – № 3(3). – S. 46–61.

4. A short tutorial on Gaussian Mixture Models [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.computerrobotvision.org/2010/tutorial_day/GMM_said_crv10_tutorial.pdf.

5. Kenny P., Boulianne G., Ouellet P., Dumouchel P. Speaker and Session Variability in GMM-Based Speaker Verification // IEEE Transact. on Audio, Speech, and Language Processing. 2007. Vol. 15, N 4. P. 1448–1460.

6. Vogt R. J., Lustri C. J., Sridharan S. Factor Analysis Modelling for Speaker Verification with Short Utterances // Proc. Of Speaker and Language Recognition Workshop “Odyssey-2008”. Stellenbosch, South Africa, 2008. P. 1–5.

7. Kanagasundaram A., Vogt R., Dean D.B., Sridharan S., Mason M. W. I-vector based speaker recognition on short utterances // Proc. of 12th Annual Conf. of International Speech Communication Association (INTERSPEECH 2011). Firenze Fiera, Florence, 2011. P. 2341–2344.

8. Kanagasundaram A., Vogt R.J., Dean D. B., Sridharan S. PLDA based speaker recognition on short utterances // Proc. of Speaker and Language Recognition Workshop “Odyssey-2012”. Singapore, 2012. P. 28–33.

9. Larcher A.O., Bonastre J.-F., Mason J. S. D. From GMM to HMM for embedded password-based speaker recognition // Proc. 16th Europ. Signal Processing Conf. (EUSIPCO-2008). Lausanne, Switzerland, 2008. P. 1–5.

10. Juang B. H., Rabiner L. R. Hidden Markov Models for Speech Recognition // Technometrics. 1991. Vol. 33, № 3. P. 251–272.

11. Subramanya A., Zhengyou Z., Surendran A. C., Nguyen P., Narasimhan M., Acero A. A Generative-Discriminative Framework using Ensemble Methods for Text-Dependent Speaker Verification // Proc. of the Intern. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-2007). Honolulu, Hawaii, USA, 2007. Vol. 4. P. 225–228.

12. Kovtun V.V. Vykorystannia mnozhyny mikrofoniv u avtomatyzovanii systemi rozpiznavannia movtsia krytychnoho zastosuvannia / M.M. Bykov, V.V. Kovtun // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2017. – № 3. – S. 67–73.

13. Paliwal K.K., Atal B.S. Frequency related representation of speech // Proc. EUROSPEECH, pp. 65–68 Sep. (2003).

14. Fukuda T., Takigawa M., Nitta T. Peripheral features for HMMbased speech recognition // Proc. ICASSP, 1: pp. 129–132 (2001).

15. Baum L. Statistical inference for probabilistic functions of finite state Markov chains / L. Baum, T. Petrie // Ann. Math. Statist. – 1966. – Vol. 37, no. 6. – P. 1554–1563.

16. Dempster A. Maximum-likelihood from incomplete data via the EM algorithm / A. Dempster, N. Laird, D. Rubin // J. Roy. Stat. Soc. Ser. B. – 1977. – Vol. 39, no. 1. – P. 1–38.

17. Grézl F. Adaptation of multilingual stacked bottle-neck neural network structure for new language / F. Grézl, M. Karafiát, K. Veselý // Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2014. – P. 7654–7658.

Рецензія/Peer review : 20.09.2017 р. Надрукована/Printed :27.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. О.В. Бісікало

УДК 519.16:621.395

С.П. ГЛАВАЦКИЙ
Одесская национальная академия связи им. О.С. Попова

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ПАКЕТОВ В МАГИСТРАЛЬНОЙ СЕТИ ПРОВАЙДЕРА

В работе проведено исследование основных параметров производительности магистральной сети провайдера, работающей по технологии 10 Gigabit Ethernet. В качестве источника трафика использовался реальный трафик домашних абонентов, объемом от 200Мб/с до 1200Мб/с. В результате анализа также были получены данные о количестве кадров разной длины в реальной высоконагруженной сети и произведены расчеты полезной пропускной способность сети 10 Gigabit Ethernet. для кадров максимального и минимального размера. Для проведения исследований в качестве методологического аппарата использовались рекомендации RFC2544, реализованные в исследуемом коммутаторе. Полученные данные позволяют оценить полезную пропускную способность исследуемого участка сети и временную зависимость распределения кадров.

Ключевые слова: 10 Gigabit Ethernet, размер кадра, полезная пропускная способность, производительность сети, распределения кадров по размерам.

S.P. GLAVATSKIY
O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

ANALYSIS OF PACKET SIZES IN THE PROVIDER MAIN NETWORK

In work, the basic parameters of productivity of a backbone network of the provider working on technology 10 Gigabit Ethernet are discovered. As a source of traffic, the real traffic of home subscribers, from 200Mb / s to 1200Mb / c, was used. As a result of the analysis, data on the number of frames of different lengths in a real high-loaded network were also obtained and calculations were made of the useful network bandwidth of 10 Gigabit Ethernet. for frames of the maximum and minimum size. To conduct research as a methodological tool, the recommendations RFC2544 implemented in the investigated switch were used. The obtained data allow estimating the useful throughput of the investigated network segment and the time dependence of the frame allocation.

Keywords: 10 Gigabit Ethernet, frame size, useful bandwidth, network performance, frame allocation by size.

Вступление

В настоящее время технология Ethernet является одной из наиболее широко распространенных и востребованных технологий для создания домашних сетей. Около 90% всех компьютерных сетей работают именно по этой технологии. С момента создания технология Ethernet пережила ряд модификаций. В зависимости от скорости передачи данных и передающей среды существует несколько вариантов технологии. К наиболее популярным относятся Fast Ethernet, Gigabit Ethernet и 10 Gigabit Ethernet (далее – 10GE). В сетях Ethernet используются пакеты переменной длины. Минимальная длина кадра составляет 64 байта, максимальная равна 1518 байтам [1]. Размер пакета может существенным образом повлиять на эффективную пропускную способность протокола, а значит и на производительность сети. Знание эффективной пропускной способности каналов связи является важной задачей при исследовании и расчете показателей производительности компьютерных сетей.

Из проведенных ранее исследований [2, 3] получены данные о зависимости производительности сети от размеров пакетов. Современные исследования показывают влияние различных параметров на производительность сети Ethernet. К наиболее интересным можно отнести работу Гулиуса В. А. и Янковского А. А. [4], в которой рассматриваются методы оценки производительности сети Fast Ethernet. Работа Виноградова Н. А. [5] посвящена исследованию характеристик полезной пропускной способности в условиях изменяющейся нагрузки. Обнаруженные исследования распределение длин пакетов в Ethernet [6] были произведены в сети крупного банка в 2014 году. Стоит отметить, что соотношение кадров по размерам меняется во времени в зависимости от использования абонентами различных сетевых устройств и состояния физической среды передачи. Несмотря на множество публикаций по этой теме, работ по исследованию 10GE не обнаружено, а исследования о размерах кадров [6] морально устарели и не соответствуют для современных домашних сетей.

Целью настоящей работы является исследование зависимости параметров производительности сети 10GE от размеров кадров и метод расчета полезной пропускной способности с учетом количества переданных кадров разного размера. В качестве объекта исследований выступает коммутатор Dlink DGS-3420-26SC и магистральный участок сети провайдера построенный по технологии 10GE. В качестве источника трафика используются абонентские сетевые устройства, которых на данном участке сети около 800. Полученные данные позволят оценить состояние сети и принять меры для более эффективного использования каналов связи.

Экспериментальная часть

10GE – это более быстрая версия Ethernet, которая поддерживает скорость передачи данных до 10 Гбит/с и полностью совместима с предыдущими стандартами Ethernet. 10GE не поддерживает полудуплексный режим работы. Потенциальный рынок для 10-гигабитного Ethernet огромен. Существуют большие группы пользователей, которым необходим 10GE, например, корпоративные пользователи,

университеты, телекоммуникационные операторы и поставщики интернет услуг.

Одно из основных преимуществ стандарта 10GE – то, что он предлагает недорогостоящее решение для увеличения пропускной способности сети. Так, например, оптические SFP модули 10GE стоят от 500 до 1000 у.е.

Стандарт обладает низкой стоимостью внедрения, обслуживания и управление. В дополнение к преимуществу низкой стоимости внедрения, 10GE обеспечивает более быструю коммутацию. Поскольку 10GE использует один и тот же формат Ethernet, он обеспечивает простую интеграцию с сетями LAN, MAN и WAN. Нет необходимости в фрагментации пакетов, повторной сборке или преобразовании адресов, что избавляет от необходимости использовать маршрутизаторы, которые намного медленнее, чем коммутаторы.

Основной проблемой нового стандарта является то, что 10GE оптимизирован для данных и не обеспечивает качество услуг. Однако качество услуг может быть реализовано на более высоком уровне.

В настоящее время термин Ethernet используется для описания всех локальных сетей, использующих режим коллективного доступа к среде передачи данных с обнаружением коллизий и опознанием несущей. Данный метод используется в сетях, построенных по логической топологии с общей шиной. При данной топологии сети все компьютеры имеют непосредственный доступ к физической среде передачи данных, поэтому она может быть использована для обмена данными между двумя любыми узлами сети.

Одновременно, с учетом задержки распространения сигнала по физической среде все компьютеры сети имеют возможность получать данные, которые любой из компьютеров начал передавать на общую шину. Кабель, к которому подключены все компьютеры, работает в режиме коллективного доступа. В определенный временной момент передавать данные на общую шину может только один компьютер в сети. При этом все компьютеры сети обладают равными правами доступа к среде. Чтобы упорядочить доступ компьютеров к общей шине, используется метод коллективного доступа с опознанием несущей и обнаружением коллизий (CSMA/CD) [7].

Для характеристики загруженности сети вводят понятие коэффициента загруженности или использования сети. Коэффициент загруженности сети определяется как отношение трафика, передаваемого по сети, к её максимальной пропускной способности.

Для сетей 10GE максимальная пропускная способность равна 10 Гбит/с, а трафик, передаваемый по сети, равен сумме интенсивностей трафиков, генерируемых каждым клиентом сети.

Говоря о максимальной пропускной способности сети, следует различать полезную и полную пропускную способность. Под полезной пропускной способностью понимается скорость передачи полезной информации, объем которой всегда несколько меньше полной передаваемой информации, так как каждый передаваемый кадр содержит служебную информацию, гарантирующую его правильную доставку адресату.

Отличие полезной пропускной способности от полной пропускной способности зависит от длины кадра. Так как доля служебной информации всегда одна и та же, то, чем меньше общий размер кадра, тем выше «накладные расходы». Служебная информация в кадрах Ethernet составляет 18 байт (без преамбулы), а размер поля данных кадра меняется от 46 до 1500 байт.

Сам размер кадра меняется:

от 46 + 18 = 64 байт до 1500 + 18 = 1518 байт.

Поэтому для кадра минимальной длины полезная информация составляет всего лишь 46/64 = 0,72 от общей передаваемой информации, а для кадра максимальной длины 1500/1518 = 0,99 от общей информации [8].

Чтобы рассчитать полезную пропускную способность сети для кадров максимального и минимального размера, необходимо учесть различную частоту следования кадров. Естественно, что, чем меньше размер кадров, тем больше таких кадров будет проходить по сети за единицу времени, перенося с собой большее количество служебной информации.

Произведем расчет для скорости передачи данных 10 Гбит/с, которую обеспечивают сети 10GE. Размеры кадра в байтах: минимальный N_{KMIN1} байт и максимальный N_{KMAX1} байт – определяют по формулам:

$$N_{KMIN1} = N_{СЛ} + N_{ПМIN} + N_{ПЗ}, \quad (1)$$

$$N_{KMAX1} = N_{СЛ} + N_{ПМAX} + N_{ПЗ}, \quad (2)$$

где $N_{СЛ}$ – служебная информация в кадрах Fast Ethernet, байт; $N_{СЛ}$ = 26 байт;

$N_{ПМIN}$ – минимальный размер поля данных кадра, байт; $N_{ПМIN}$ = 46 байт;

N_{KMAX} – максимальный размер поля данных кадра, байт; N_{KMAX} = 1500 байт;

$N_{ПЗ}$ – пауза между кадрами, байт; $N_{ПЗ}$ = 12 байт.

Подстановкой указанных выше значений в формулы (1) и (2), получаем:

$$N_{KMIN1} = 26 + 46 + 12 = 84 \text{ байт,}$$

$$N_{KMAX1} = 26 + 1500 + 12 = 1538 \text{ байт.}$$

Так как один байт равен восьми битам, рассчитываем минимальный размер кадра в битах N_{KMIN2} и максимальный размер кадра в битах N_{KMAX2}:

$$N_{KMIN2} = 84 \times 8 = 672 \text{ бит,}$$

$$N_{KMAX2} = 1538 \times 8 = 12304 \text{ бит.}$$

Пропускную способность $N_{ПР}$, бит определяют по формуле:

$$N_{ПР} = N_1 \times N_2 \times K_{ПР}, \quad (3)$$

где N_1 – количество бит в одном килобите; N_1 = 1024;

N_2 – количество килобит в одном мегабите; N_2 = 1024;

$K_{ПР}$ – коэффициент скорости передачи данных; $K_{ПР}$ = 10000.

Подстановкой указанных выше значений в формулу (3) получено:

$$N_{ПР} = 1024 \times 1024 \times 10000 = 10485760000 \text{ бит.}$$

Период следования кадров при минимальном размере кадра T_{KMIN}, мкс и при максимальном размере кадра T_{KMAX}, мкс определяют по формулам:

$$T_{KMIN} = \frac{N_{KMIN2}}{N_{ПР}} \times K_{МКС}, \quad (4)$$

$$T_{KMAX} = \frac{N_{KMAX2}}{N_{ПР}} \times K_{МКС}, \quad (5)$$

где N_{KMIN2} – минимальный размер кадра в битах; N_{KMIN2} = 672 бит;

N_{KMAX2} – максимальный размер кадра в битах; N_{KMAX2} = 12304 бит;

$N_{ПР}$ – пропускная способность, бит; $N_{ПР}$ = 10485760000 бит;

$K_{МКС}$ – количество микросекунд в одной секунде; $K_{МКС}$ = 10000000.

Подстановкой указанных выше значений в формулы (4) и (5), получаем:

$$T_{KMIN} = \frac{672}{10485760000} \times 1000000 = 0{,}064 \text{ мкс,}$$

$$T_{KMAX} = \frac{12304}{10485760000} \times 1000000 = 1{,}173 \text{ мкс.}$$

Частоту следования кадров при минимальном размере кадра F_{KMIN}, кадр/с и при максимальном размере кадра F_{KMAX}, кадр/с определяют по формулам:

$$F_{KMIN} = \frac{N_{ПР}}{N_{KMIN2}}, \quad (6)$$

$$F_{KMAX} = \frac{N_{ПР}}{N_{KMAX2}}, \quad (7)$$

где $N_{ПР}$ – пропускная способность, бит; $N_{ПР}$ = 10485760000 бит;

N_{KMIN2} – минимальный размер кадра в битах; N_{KMIN2} = 672 бит;

N_{KMAX2} – максимальный размер кадра в битах; N_{KMAX2} = 12304 бит.

Подстановкой указанных выше значений в формулы (6) и (7) получено следующее:

$$F_{KMIN} = \frac{10485760000}{672} = 15603801 \text{ кадр/с,}$$

$$F_{KMAX} = \frac{10485760000}{12304} = 852224 \text{ кадр/с.}$$

Полезную пропускную способность кадров при минимальном размере кадра P_{MIN}, бит/с и при

максимальном размере кадра P_{MAX} , бит/с определяют по формулам:

$$P_{MIN} = F_{KMIN} \times N_{ПМIN} \times K_{ББ} , \quad (8)$$

$$P_{MAX} = F_{KMAX} \times N_{ПМAN} \times K_{ББ} , \quad (9)$$

где F_{KMIN} – частота следования кадров при минимальном размере кадра, кадр/с;

$$F_{KMIN} = 15603801 \text{ кадр/с;}$$

F_{KMAX} – частота следования кадров при максимальном размере кадра, кадр/с;

$$F_{KMAX} = 852224 \text{ кадр/с;}$$

$N_{ПМIN}$ – минимальный размер поля данных кадра, байт; $N_{ПМIN}$ = 46 байт;

$N_{ПМAN}$ – максимальный размер поля данных кадра, байт; $N_{ПМAN}$ = 1500 байт;

$K_{ББ}$ – количество бит в байте; $K_{ББ}$ = 8.

Подстановкой указанных выше значений в формулы (8) и (9), получаем:

$$P_{MIN1} = 15603801 \times 46 \times 8 = 5742198768 \text{ бит/с,}$$

$$P_{MAX1} = 852224 \times 1500 \times 8 = 10226688000 \text{ бит/с.}$$

Полезную пропускную способность при минимальном размере кадра P_{MIN2}, Мбит/с, и полезную пропускную способность при максимальном размере кадра P_{MAX2}, Мбит/с, определяют по формулам:

$$P_{MIN2} = \frac{P_{MIN1}}{N_1 \times N_2} , \quad (10)$$

$$P_{MAX2} = \frac{P_{MAX1}}{N_1 \times N_2} , \quad (11)$$

где N_1 – количество бит в одном килобите; N_1 = 1024;

N_2 – количество килобит в одном мегабите; N_2 = 1024.

Подстановкой указанных выше значений в формулы (10) и (11), получено:

$$P_{MIN2} = \frac{5742198768}{1024 \times 1024} = 5476 \text{ Мбит/с,}$$

$$P_{MIN2} = \frac{10226688000}{1024 \times 1024} = 9753 \text{ Мбит/с.}$$

Все данные расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пропускная способность для кадров минимального и максимального размера 10GE

Наименование	Единицы измерения	Минимальный кадр	Максимальный кадр
Размер поля данных	Байт	46	1500
Размер служебной информации	Байт	26	26
«Размер» паузы между кадрами	Байт	12	12
Итоговый размер кадра	Байт	84	1538
Итоговый размер кадра	Бит	672	12304
Пропускная способность	Бит	10485760000	10485760000
Период следования кадров	Мкс	0,064	1,173
Частота следования кадров	кадр/с	15603801	852224
Полезная пропускная способность (бит)	бит/с	5742198768	10226688000
Полезная пропускная способность (Мбит)	Мбит/с	5476	9753

Для получения статистических данных о размерах пакетов в сети был использован коммутатор уровня распределения DGS-3420-26SC с большим объемом трафика одного из одесских провайдеров. Загрузка магистрального порта коммутатора за 14 дней отображена на рис. 1.

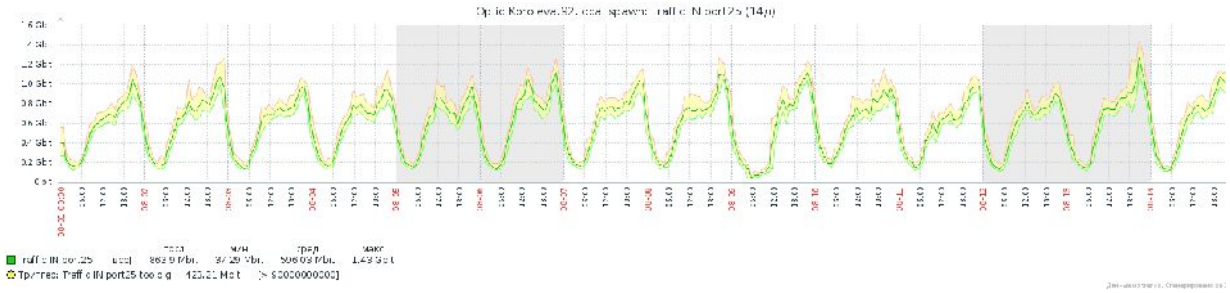


Рис. 1. Загрузка порта коммутатора

Как видно из рис. 1, загрузка исследуемого порта коммутатора меняется от 100–200 Мбит/с ночью до 1,2 Гбит/с в “час пик”.

Данная модель коммутатора имеет 24 гигабитных SFP и 2 десяти гигабитных порта SFP+. Стоит отметить, что коммутатор имеет встроенное программное обеспечения для отображения размеров пакетов согласно рекомендаций RFC2544 [9]. Пример отображения данных о пакетах на порту отображены на рис. 2.

```
                    DGS-3420-26SC Gigabit Ethernet Switch
                            Command Line Interface

                          Firmware: Build 1.00.B046
          Copyright(C) 2011 D-Link Corporation. All rights reserved.
UserName:spawn
PassWord:*********

DGS-3420-26SC:admin#show packet ports 25
Command: show packet ports 25

 Port number : 25
 Frame Size/Type       Frame Counts                 Frames/sec
 ---------------       ----------------------       -----------
 64                    132905193                    171
 65-127                2722523355                   21915
 128-255               2601114503                   1833
 256-511               2901231310                   1002
 512-1023              2992968174                   1462
 1024-1518             1023279572                   33690
 1519-2047             1471414638                   3762
 2048-4095             0                            0
 4096-9216             0                            0
 Unicast RX            3502024123                   39854
 Multicast RX          343405198                    16
 Broadcast RX          394689881                    14
```

Рис. 2. Отображение данных о пакетах на порте коммутатора

С целью получения данных с коммутатора была написана небольшая программа на языке shell, которая авторизуется по протоколу Telnet с коммутатором, отображает статистику исследуемого порта, добавляет время измерения и удаляет данные счетчика пакетов. Программа размещалась на внутреннем сервере под управлением ОС FreeBSD и запускалась планировщиком cron каждый час. Полученные данные добавлялись в текстовый файл. Листинг программы отображён ниже.

```
#!/bin/sh
HOST='172.16.246.32'
USER='spawn'
PASSWD='xxxxxxx'
CMD='show packet ports 25'
CMD2='clear counters'
echo $(date)(
echo open "$HOST"
sleep 2
echo "$USER"
sleep 2
echo "$PASSWD"
sleep 2
echo "$CMD"
sleep 2
echo "$CMD2"
```

```
sleep 2
echo "logout") | telnet
```

Для изучения распределения размеров кадров во времени суток проанализируем полученные данные за 1 Февраля 2017г. Полученные данные сведем в табл. 2.

Таблица 2

Статистика распределения кадров по размерам за 1 Февраля 2017

Время замера	Количество кадров						
	64	65-127	128-255	256-511	512-1023	1024-1518	1519-2047
00:00	1339906	173393774	7134215	3075843	6065822	212586020	29131803
01:00	832339	128457687	4827640	2153928	4127921	141374854	19747733
02:00	1088280	109898750	3165762	1572959	3284848	105050610	15164762
03:00	546420	95585965	2115981	1337431	1473638	85547452	10676539
04:00	542668	76682744	1532787	1072243	1068399	51721572	4990834
05:00	598332	73820915	1349116	947822	988443	46460109	4364260
06:00	587317	73385346	1427418	961104	1038513	52073397	4450456
07:00	551479	77717364	1653670	1183101	1343126	80534966	8280954
08:00	548747	95311085	2645101	1645621	1846959	112461508	11725248
09:00	557521	110533131	3662490	2123861	2919038	130047960	14890824
10:00	564172	123694160	3954445	2425646	2957248	136246689	16311109
11:00	687375	130282558	4726758	2706369	2527804	136476977	12280007
12:00	616723	130156024	5166997	2756102	2947941	157075891	15202483
13:00	820616	140076524	5777767	2806207	3179550	151761978	18939848
14:00	799370	132391401	6112479	3239230	3723287	152838655	21779049
15:00	1096853	146330798	6571290	3709056	3486729	180835825	22826530
16:00	1173549	158852841	7924186	4335003	3709854	195893167	23549756
17:00	854499	137927432	8269130	4219201	4415895	231807368	22954895
18:00	927736	147274775	8632146	4555628	5118581	258401902	29947985
19:00	750424	159707740	11612677	6238776	6906213	276927360	32068495
20:00	2154524	189049377	15481377	5880602	6739089	311947526	32024801
21:00	916731	202501053	18449098	6774840	7552273	306050621	36352360
22:00	760921	198980755	17110124	6777101	7784627	296760604	29593117
23:00	890175	186788060	14968305	6377111	7545791	233252587	23326093
Среднее	844967	134513496	6979067	3347410	3961084	171995794	19630181
%	0,25	39,42	2,05	0,98	1,16	50,40	5,75

На основе данных из табл. 2 на рис. 3 сравнивается процент кадров различного размера за исследуемый промежуток времени.

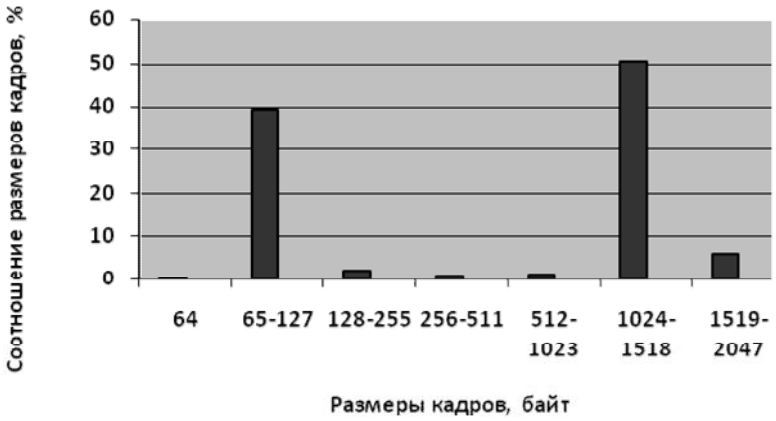


Рис. 3. Доля кадров различных размеров за 1 февраля 2017

В связи с тем, что данные о размерах пакетов в табл. 2 разбиты на диапазоны, с целью расчета показателей производительности сети округлим количество пакетов в большую сторону. Так пакеты в диапазоне от 65–127 байт будем считать как 127 байт и т.д.

Зная пропускную способность для разных размеров кадров и количество кадров определенного размера рассчитаем полезной пропускной способности сети по формуле:

$$V_S = \sum_{64}^{2047} \frac{N_S \times P_S}{N_{all}}, \quad (12)$$

где P_S – полезная пропускная способность для кадров размера s;

N_S – количество пакетов определенного размера s.

N_{all} – общее количество пакетов за время измерения.

Для расчета полезной пропускной способности сети для пакетов разного размера воспользуемся формулами (1-12) и данными из табл. 3, результат отобразим на рис. 4

Рис. 4. Временная зависимость полезной пропускной способности сети

Учитывая, что в каждом кадре Ethernet содержится 18 бит служебной информации, на основании данных из табл. 2 представим зависимость суммарного объема служебных и полезных данных от времени на рис. 5.

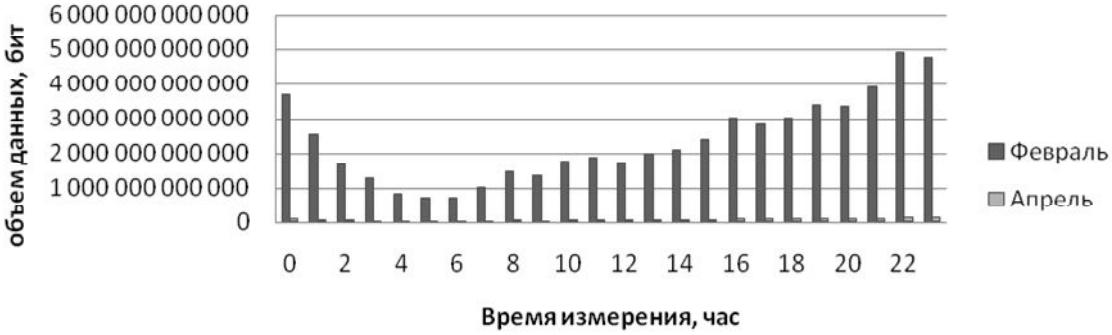


Рис. 5. Зависимость суммарного объема служебных и полезных данных от времени

В результате практических исследований, был предложен метод оценки состояния сети и получены статистические данные о временной зависимости размеров пакетов в локальной сети провайдера. Наименьшее использование сети наблюдается с 3 до 7 часов утра. Наиболее часто передаваемыми оказались пакеты размером от 1024 до 1518 байт и пакеты от 65 до 127 байт. Из рис. 4 видно, что коэффициент использования сети составляет 84-89%, что согласно [7] является свидетельством того, что сеть работает в допустимом режиме. Из рис. 5 видно, что количество служебных данных составляет 2-3%. Стоит отметить, что полученные статистические данные позволяют смоделировать современный трафик абонентской сети и оценить нагрузку на маршрутизаторы широкополосного удаленного доступа, которые являются промежуточным звеном между локальной сетью и сетью Интернет.

Выводы

В заключение можно отметить, что поставленные цели и задачи исследования достигнуты. Дальнейшие исследования предполагают измерения системных ресурсов оборудования, при различных сетевых нагрузках для оптимального выбора архитектуры сети и соответствующего оборудования. Проведенные практические исследования количества пакетов в сети по размерам кадров и расчеты пропускной способности, позволяют сделать следующие выводы:

- Наибольшее количество кадров (50.4%) имеет диапазон от 1024 до 1518 байт;
- Наибольшие потери пропускной способности вносят кадры размером от 65 до 127 байт, количество которых составляет 39.4%;
- Количество кадров по размерам в сети имеет временную зависимость;
- В сети не используются большие кадры от 2048 до 9216 байт;
- Исследуемая сеть при данных соотношениях размеров кадров имеет среднесуточную полезную пропускную способность от 8376 Мб/с до 8963Мб/с;
- Количество служебных данных Ethernet, за исследуемый промежуток времени изменяется от 2

до 3%;

- Характеристики работы сети в пределах нормы.

Литература

1. Олифер В.Г. Компьютерные сети: Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб : Питер, 2001. – 287 с.

2. Главацкий С.П. Метод анализа нагрузки на маршрутизатор при преобразовании сетевых адресов / С.П. Главацкий // Цифрові технології. – Одесса, 2016. – № 19. – С. 53–58.

3. Главацкий С.П. Дослідження впровадження і продуктивності IPV6 / С.П. Главацкий // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон, 2016. – № 59. – С. 148–154.

4. Гулиус В.А. Модель оценки производительности сети Fast Ethernet / В.А. Гулиус // Матеріали X Міжнародної науково-технічної конф. "Системний аналіз та інформаційні технології" / В.А. Гулиус, А.А. Янковский. – Київ, 2008.

5. Виноградов Н.А. Исследование характеристик полезной пропускной способности в условиях меняющейся нагрузки / Н.А. Виноградов, Н.Н. Лесная, А.С. Савченко, Е.В. Колиснык // Пробл. інформатизації та упр. – 2009. – Вип. 4. – С. 28–31.

6. Довженко Т.П. Исследование очереди маршрутизатора в сети TCP/IP с применением основных TCP-алгоритмов активного управления очередью и предотвращения перегрузок [Електронний ресурс] / Т. П. Довженко // Зв'язок. – 2015. – № 2. – С. 22–25. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zvjazok_2015_2_8.

7. Электронная библиотека [Электронный документ]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Maximum_transmission_unit.

8. Олифер В.Г. Средства анализа и оптимизации локальных сетей / Н. А. Олифер, Н. Г. Олифер. – М. : Центр Информационных Технологий, 1998.

9. Лукьянов С.А. Зависимость полезной пропускной способности от раз мера кадра для сети стандарта ETHERNET [Електронний ресурс] / С.А. Лукьянов, С.А. Хованcков, Д.И. Серогодский, Т.М. Горягина, М.Г. Котегов // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 3. – С. 52–53. – Режим доступу : https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=23321

10. RFC 2544: Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt.

References

1. Olyfer V.H. Kompiuternye sety: Pryntsypy, tekhnolohyy, protokoly / V.H. Olyfer, N.A. Olyfer. – SPb : Pyter, 2001. – 287 s.

2. Hlavatskyi S.P. Metod analyza nahruzky na marshrutyzator pry preobrazovanyy setevykh adresov / S.P. Hlavatskyi // Tsyfrovi tekhnolohii. – Odessa, 2016. – # 19. – S. 53–58.

3. Hlavatskyi S.P. Doslidzhennia vprovadzhennia i produktyvnosti IPV6 / S.P. Hlavatskyi // Vestnyk Khersonskoho natsyonalnoho tekhnycheskoho unyversyteta. – Kherson, 2016. – # 59. – S. 148–154.

4. Hulyus V.A. Model otsenky proyzvodytelnosty sety Fast Ethernet / V.A. Hulyus // Materialy Kh Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konf. "Systemnyi analiz ta informatsiini tekhnolohii" / V.A. Hulyus, A.A. Yankovskyi. – Kyiv, 2008.

5. Vynohradov N.A. Yssledovanye kharakterystyk poleznoi propusknoi sposobnosty v uslovyiakh meniaiushcheisia nahruzky / N.A. Vynohradov, N.N. Lesnaia, A.S. Savchenko, E.V. Kolysnыk // Probl. informatyzatsii ta upr. – 2009. – Vyp. 4. – S. 28–31.

6. Dovzhenko T.P. Yssledovanye ocheredy marshrutyzatora v sety TCP/IP s prymenenyem osnovnykh TCP-alhorytmov aktyvnoho upravlenyia ocherediu y predotvrashchenyia perehruzok [Elektronnyi resurs] / T. P. Dovzhenko // Zviazok. – 2015. – # 2. – S. 22–25. – Rezhym dostupu : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zvjazok_2015_2_8.

7. Elektronnaia byblyoteka [Elektronnyi dokument]. – Rezhym dostupa : https://ru.wikipedia.org/wiki/Maximum_transmission_unit.

8. Olyfer V.H. Sredstva analyza y optymyzatsyy lokalnykh setei / N. A. Olyfer, N. H. Olyfer. – M. : Tsentr Ynformatsyonnыkh Tekhnolohyi, 1998.

9. Lukianov S.A. Zavysymost poleznoi propusknoi sposobnosty ot raz mera kadra dlia sety standarta ETHERNET [Elektronnyi resurs] / S.A. Lukianov, S.A. Khovanskov, D.Y. Serohodskyi, T.M. Horiahyna, M.H. Kotehov // Sovremennye naukoemkye tekhnolohyy. – 2008. – # 3. – S. 52–53. – Rezhym dostupu : https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=23321

10. RFC 2544: Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt.

Рецензія/Peer review : 15.09.2017 р. Надрукована/Printed :28.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 004.7.052:004.414.2

Н.М. ЯКИМЧУК
Луцький національний технічний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ТА РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Розглядаються методи дослідження взаємозв'язку між двома або більш неперервними змінними – регресійно-кореляційний аналіз з множинною та покроковою регресією. Запропоновано системний підхід до знаходження оптимального рішення, заснований на збалансованому виборі числа змінних і комплектних елементів вибірки. Розглянуті способи отримання статистичних оцінок параметрів мережі, основаних на методах видалення елементів, підстановки середнього, попарного викреслювання та підстановки регресії.

Ключові слова: *мультисервісна мережа, регресійно-кореляційний аналіз, множинна і покрокова регресія, правило зупинки.*

N.M. YAKYMCHUK
Lutsk National Technical University

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF CROSS-CORRELATION AND REGRESSIVE ANALYSIS OF TELECOMMUNICATION NETWORKS

Two methods of studying the relationship between two or more continuous variables are considered - a regression-correlation analysis with multiple and stepwise regression. In a regression analysis a connection between a single variable called a dependent variable and several other called independent variables is considered. A systematic approach to finding an optimal solution based on a balanced choice of the following rule is proposed: the sample elements and/or variables with missing values should be deleted. So as to ensure a balance between the rest of the number of variables and the number of remaining elements, that is, to maximize the number of complete sample elements. There are considered the ways of receipt of statistical estimations of network parameters, based on the methods of delete of elements, substitution of middle, double deletion and substitution of regression/

Keywords*: multiservice network, regression-correlation analysis, multiple and stepwise regression, stop rule.*

Вступ. Мультисервісну мережу іноді називають мережею наступного покоління (англ. Next Generation Network, NGN). Концепція мереж NGN наступна. Змінюються самі принципи побудови систем зв'язку. Замість класичного поділу мереж зв'язку на первинну мережу і вторинні мережі сучасна архітектура мереж NGN включає в себе чотири рівні: послуг, управління, транспорту та доступу [1, 2].

Разом з тим, важливою проблемою під час проектування телекомунікаційних мереж є розробка алгоритмів, математичних методів і рівнянь, придатних для застосування під час розв'язання конкретних практичних мережних задач [3, 4].

Моделювання мережі математичними залежностями з детермінованими параметрами, тобто представлення мережі у вигляді детермінованої системи, в багатьох випадках є практично нездійсненним або дає занадто грубий, практично даремний результат з таких причин:

- отримання повної інформації про параметри і стан мережі в кожний момент часу в переважній більшості випадків практично неможливе;
- зміни стану і порушення в роботі мережі, перевантаження та інші аномальні ситуації є випадковими подіями, якими неможливо управляти – їх можна тільки прогнозувати з певною точністю.
- системи рівнянь для опису мережі будуть мати порядок, який можна порівняти з числом мережних і термінальних вузлів. Їх рішення в реальному часі потребує практично нереального обсягу обчислювальних ресурсів [5, 6], а помилки розрахунків будуть неприпустимо великі.

Тому в даний час тільки статистичні методи опису мереж, процесів обміну даними, синтезу структури мережі і оцінки параметрів, управління мережами можуть давати результати задовільної точності.

Для розробки та застосування статистичних методів мережного моніторингу та аналізу, перш за все, необхідно побудувати математичні моделі мережного трафіку [3, 7]. Очевидно, це є задачею математичної статистики [5, 8].

Метод множинної регресії. Технічні показники функціонування мережі, як правило, представляються таблицями статистичних даних:

$$\begin{pmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(i) & \cdots & y(N) \\ x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(i) & \cdots & x_1(N) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_j(1) & x_j(2) & \cdots & x_j(i) & \cdots & x_j(N) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_k(1) & x_k(2) & \cdots & x_k(i) & \cdots & x_k(N) \end{pmatrix}.$$

Статистичні дані представляють собою вибірку деякої реалізації значень випадкових величин:

– i -а реалізація чисельного значення результату y_i, $i - 1, 2, \ldots, N$;

– j -а реалізація чисельного значення j -го фактора x_j, $j = 1, 2, \ldots, N$.

Використання статистичних даних дозволяє домагатися оптимальних результатів, керуючи величинами факторів, або прогнозувати можливу величину результату при сформованих значеннях факторів. Загальне призначення множинної регресії полягає в аналізі зв'язку між кількома незалежними змінними (званими також регресорами) і залежної змінної [6].

Оцінювання проводиться за спостереженнями за входом (рядки матриці спостережень $\mathbf{X}$) і виходом (елементи вектора відгуків $\bar{\mathbf{y}}$).

Між випадковою величиною результату і випадковою величиною фактора є стохастична (випадкова) залежність, тобто існує кореляційна залежність.

У загальному випадку, процедура побудови множинної регресії полягає в оцінюванні параметрів лінійного рівняння. Функціональна залежність результату від факторів представляється рівнянням регресії

$$E\left[\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}\right] = \begin{pmatrix} E[y_1] \\ E[y_2] \\ E[y_3] \\ \vdots \\ E[y_m] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \ldots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \ldots & x_{2n} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \ldots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{m1} & x_{m2} & \ldots & x_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix},$$

або те ж саме в компактному вигляді:

$$E[\vec{y}] = \mathbf{X}\vec{\theta}.$$

Регресійні коефіцієнти представляють незалежні вклади кожної незалежної змінної в передбачення залежної змінної. Для відбору остаточного рівняння регресії зазвичай використовують два протилежних критерії. *По-перше*, щоб зробити рівняння корисним для передбачення, ми повинні прагнути включити в модель по можливості більше незалежних змінних з тим, щоб можна було більш надійно визначити прогнозовані величини. *По-друге*, через витрати, пов'язані з отриманням великої кількості інформації при і її подальшою перевіркою, необхідно прагнути, щоб рівняння включало якнайменше незалежних змінних.

Введемо поняття відсутніх значень. При використанні одновимірних за своєю природою методів аналізу (наприклад, t -критерію) найбільш розумний спосіб дії полягає у видаленні з вибірки елементів з відсутнім значенням $\boldsymbol{X}$ (аналізованої змінної). Однак ситуація змінюється при використанні істотно багатовимірних методів аналізу, тобто коли для кожного елемента вибірки є p спостережуваних змінних $X_1, X_2, \ldots, X_p$. Тепер, якщо елемент вибірки має відсутнє значення, скажімо, для змінної X_1, видалення цього елемента вибірки з аналізу не є необхідним, оскільки воно призводить до втрати інформації про змінні, що доставляється цим елементом. Так як множинний лінійний регресійний аналіз, так само як й інші багатовимірні процедури [5], засновані на векторі середніх *m* і матриці коваріацій *S*, можна залишити цей елемент у вибірці і використовувати наявні в ньому виміри для обчислення оцінок вектора середніх $\bar{\mathbf{x}}$ і матриці коваріацій **S**.

Оцінювання статистичних параметрів. Розглянемо тепер різні методи оцінювання $\bar{\mathbf{x}}$ та **S** (що еквівалентно, матриці кореляцій **R**), коли відсутні деякі значення [6].

Метод 1. Для обчислення оцінок $\bar{\mathbf{x}}$ та **S** використовуються тільки n_c комплектних елементів. Цей метод називається методом *видалення елементів*.

Метод 2. Для отримання використовуються спостереження. Замість відсутніх значень змінної підставляється її середня величина. Потім, використовуючи укомплектовану таким чином вибірку обсягу, отримують $\bar{\mathbf{x}}$ та $\mathbf{S}$. Цей метод називається методом *підстановки середнього*.

Метод 3. Використовується n_i спостережень для отримання $\bar{x}_i$ та s_i й n_{ij} спостережень – для обчислення s_{ij}. Ці статистики служать компонентами $\bar{\mathbf{x}}$ та $\mathbf{S}$.

Метод 4. Використовується n_i спостережень для отримання $\bar{x}_i$ та s_i й n_{ij} спостережень – для обчислення r_{ij}. Потім обчислюється значення s_{ij} як $s_{ij} = r_{ij} \cdot s_i \cdot s_j$, в чому і полягає відмінність даного методу від попереднього. Методи 3 і 4 називаються методами *попарного викреслювання*.

Метод 5. Використовується n_c комплектних елементів для оцінки регресії будь-якої змінної по всім іншим змінним. Наприклад, нехай рівняння регресії має вигляд $X_1 = f\left(X_2, \ldots, X_p\right)$. Тепер, якщо в *j*-му випадку є відсутнє значення X_1, воно замінюється оцінкою $\hat{x}_{1j} = f\left(x_{2j}, \ldots, x_{pj}\right)$. Аналогічні рівняння можна отримати і для $X_2, \ldots, X_p$. Потім укомплектовані таким чином спостереження використовуються для обчислення $\bar{\mathbf{x}}$ та $\mathbf{S}$.

Метод 6. На відміну від методу 5 для передбачення значення, наприклад, використовується або

одна змінна з $X_2,\ldots,X_p$, що найбільш корелювали з X_1, або деяка підмножина змінних з $X_2,\ldots,X_p$. Методи 5 і 6 носять назви методів *підстановки регресії*.

Основний недолік будь-якого з перерахованих методів пов'язаний з тим, що їх статистичні властивості за рідкісним винятком невідомі. Крім того, застосування таких методів часто призводить до зміщених оцінок.

Компроміс між цими критеріями може бути досягнутий за рахунок вибору "найкращого" рівняння, що включає оптимальну кількість незалежних змінних. В роботі для пошуку "найкращого" рівняння регресії застосований кроковий метод (покрокова регресія).

З огляду на все це можна дати наступну рекомендацію досліднику: елементи вибірки та/або змінні з відсутніми значеннями повинні бути видалені так, щоб забезпечити баланс між рештою числа змінних і числом елементів, що залишилися, тобто, максимізувати число комплектних елементів вибірки.

Отже, якщо елемент містить багато пропусків, його потрібно видалити. З іншого боку, слід видалити змінну, якщо її значення невідомо для більшості елементів. Після цього можна звичайним чином використовувати метод найменших квадратів або процедури багатовимірного статистичного аналізу.

Якщо число незалежних змінних велике, такий підхід для визначення найкращої підмножини практично не потрібен навіть при застосуванні ЕОМ. Наприклад, якщо p = 5, є всього 5 + 10 + 10 + 5 + 1 = 31 рівняння регресії, а якщо p = 10, то їх число становить вже 2× (10 + 45 + 120 + 210) + 252 + 1 = 1023. взагалі, коли число змінних дорівнює p, є $2p$–1 регресійних рівнянь. Обмеження на машинний час і допустимі витрати призводять до необхідності пошуку інших підходів.

Одним з рішень є покрокова регресія (пряма), коли незалежні змінні одна за одною включаються в підмножину згідно попередньо заданому критерію. У той же час деяка змінна може бути замінена іншою змінною, яка не входить в набір, або видалена з нього. Сукупність критеріїв, що визначають, які змінні включати, замінювати і видаляти, називається покроковою процедурою.

За допомогою покрокової процедури виходить упорядкований список предикторів. Наприклад, якщо p=5, такий список може мати вигляд $X_{2,}X_5, X_1, X_4$ і X_3. Для визначення "найкращої" підмножини з цього списку вибираються $m \le p$ перших змінних так, щоб

a) вони можливо краще передбачали **Y** і

b) їх число t було якомога менше.

Іншими словами, економний набір складається зі змінних впорядкованого списку, які мають найбільш високу здатність до прогнозування. У прикладі, наведеному вище, такий набір міг би складатися тільки з змінних X_2 і X_3, якби регресія по ним була майже такою ж "якісною", як і регресія з $X_{2,}X_5, X_1, X_4$ та X_3.

Процедура визначення числа t називається правилом зупинки. Таким чином, суть проведеного дослідження полягає саме в реалізації системного підходу. Методика безперервної діагностики мережі полягає в розбитті процесу на наступні взаємопов'язані етапи.

1. На першому етапі проводиться діагностика на фізичному рівні для виключення помилок і правильної інтерпретації результатів подальшого тестування.

2. На другому етапі доцільно проводити діагностику термінальних вузлів мережі шляхом стресового тестування мережі в двох режимах:

– режим калібрування з навантаженням тільки на мережу для виявлення помилок апаратної і програмної реалізації;

– режим з навантаженням тільки на мережу для виявлення проблем взаємодії станцій, вузьких місць на сервері і в каналах зв'язку.

3. На наступному етапі проводиться діагностика каналів зв'язку і серверів з використанням аналізаторів протоколів і аналізаторів серверів. Спільна обробка і аналіз отриманих в процесі тестування швидкісних характеристик, трендів характеристик мережного трафіку і лічильників серверів також здійснюється статистичними методами, що дозволяє встановити причини неправильного функціонування того чи іншого каналу зв'язку (сервера).

4. Заключний етап наскрізної діагностики мережі – діагностика прикладного мережного програмного забезпечення.

Висновки. Технологія моніторингу та аналізу телекомунікаційної мережі як великої та складної системи являє собою набір діагностичних засобів і методику їх використання, які дозволяють дати об'єктивну оцінку якості роботи прикладних програм в мережі і обґрунтувати рекомендації щодо поліпшення їх роботи. Концепція наскрізної діагностики мережі передбачає вміння ефективно оцінити, як працюють всі компоненти мережі з урахуванням їх взаємозв'язків і взаємовпливу. При цьому значна частина проблем функціонування мережі криється зовсім не у вичерпанні ліміту пропускної здатності, а в проблемах взаємодії апаратури, конфігурації, організації мережі і роботи користувачів.

Сьогодні все частіше системні адміністратори стикаються з проблемами в роботі додатків, викликані нераціональним використанням пропускної спроможності локальної мережі. Різного роду паразитний трафік здатний повністю поглинути все ресурси або поставити певні сервіси в невигідні умови роботи. У таких випадках доводиться вдаватися до рішень, що дозволяє розподіляти пропускні канали так,

щоб забезпечити роботу важливих для виробничого процесу додатків.

Важливим є також те, що схема управління трафіком на основі пріоритетів ще не повністю стандартизована, і, як правило, не підтримується додатками, виконуваними на окремих ПК. В таких умовах поставлену задачу легше і простіше перекласти на мережне комунікаційне обладнання.

Література

1. Tanenbaum A. S. Computer networks, 5th ed. / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 p.
2. Stallings W. Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. – Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 2016. – 538 p.
3. Виноградов Н. А. Анализ потенциальных характеристик устройств коммутации и управления сетями новых поколений / Н. А. Виноградов // Зв'язок. – 2004. – № 4. – С. 10–17.
4. Лесная Н. Н. Сравнительный анализ методов оценки характеристик интеллектуальной сети / Н. Н. Лесная // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2009. – № 2(10). – С. 97–102.
5. Афифи А. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / А. Афифи, С. Эйзен. – М. : Мир, 1982. – 488 с.
6. Мостеллер Ф. Анализ данных и регрессия : вып. 1 / Ф. Мостеллер, Дж. Тьюки. – Москва : Финансы и статистика, 1982. – 317 с.
7. Торошанко Я. І. Задачі моніторингу та аналізу параметрів телекомунікаційних мереж / Я. І. Торошанко, А. О. Булаковська, М. С. Височіненко, В. С. Шматко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – № 3. – С. 62–69.
8. Барабаш Ю. Л. Вопросы статистической теории распознавания / Ю. Л. Барабаш, Б. В. Варский, В. Т. Зиновьев, В. С. Кириченко, В. Ф. Сапегин. – Москва : Советское радио, 1967. – 400 с.

References

1. Tanenbaum A. S. Computer networks, 5th ed. / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 p.
2. Stallings W. Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. – Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 2016. – 538 p.
3. Vinogradov N. A. Analysis of potential descriptions of commutation devices of and management of the new generations networks / N. A. Vinogradov // Zviazok. – 2004. – № 4. – P. 10-17.
4. Lesnaia N. N. Comparative analysis of estimation methods of intellectual network descriptions // Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku. – 2009. – № 2(10). – P. 97-102.
5. Afifi A. Statisticalanalysis: using computer / A. Afifi, S. Eizen. – *Moskva: Mir*, 1982. 488 p.
6. Mosteller F. Data analysis and regression: issue 1 / F. Mosteller, J. Tyuki. – Moskva: Finansy i statistika, 1982. – 317 p.
7. Toroshanko Ya. I. Monitoring and analyse of telecommunication network parameters / Ya. I. Toroshanko, A. O. Bulakovska, M. S. Vysochinenko, V. S. Shmatko // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. – 2014. – No. 3. – P. 62-69.
8. Barabash Yu. L. Questions of statistical recognition theory / Yu. L. Barabash, B. V. Varskyi, V. T. Zinov'ev, V. S. Kirichenko, V. F. Sapegin. – Moskva: Sovietskoe radio, 1967. – 400 p.

Рецензія/Peer review : 21.09.2017 р. Надрукована/Printed :31.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н. Бойко Ю. М.

УДК 004.415

О.А. КРАВЧУК
Хмельницький національний університет

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ ПРОГРЕСИВНИХ ВЕБ-ДОДАТКІВ

В статті розглядається технологія Progressive Web Apps, що є найбільш сучасною тенденцією в програмуванні мобільних веб-додатків. Все більше великих компаній додають підтримку даної технології в своїх основних ресурсах в тому чи іншому вигляді. В статті розглянуто основні принципи роботи даної технології, висвітлено переваги перед «нативними» додатками мобільних пристроїв.

Ключові слова: PWA, прогресивний веб-додаток, новітня технологія, висока швидкодія, оптимізація, автономний додаток, мобільний додаток, гаджет, веб-розробка.

O.A. KRAVCHUK
Khmelnytsky National University

REVIEW AND ANALYSIS OF ADVANCED ARCHITECTURE OF WEB APPLICATIONS

In the article we review a new technology as call a Progressive Web Apps. This format for creating mobile sites attracted attention due to the relative ease of development and almost instantaneous interaction with the user. The primary purpose of PWA is to increase conversions, number of users, and the convenience of using Web-based applications on mobile devices. It is the most current trend in programming of mobile web applications. More and more big companies added support of this technology in their main websites The proposal to install a progressive application is only displayed when the web application meets certain criteria and the user has shown interest by re-visiting the site. Installing the application is instantaneous. All components that require a long boot already have been installed in the cache when the user first visits the site. Progressive applications are much smaller in size, since they effectively use browser capabilities. Pop-up messages, offline work and many other advanced features will work even if the visitor has never installed it. This article discusses the basic principles of this technology, highlighted the benefits to the "native" mobile applications.

Keywords: PWA, progressive web apps, progressive technology, high-speed mobile web, optimization, offline application, mobile application, gadget, web development.

Постановка проблеми. Уявіть, що ваш сайт взаємодіє з користувачем як додаток [2]. Тобто користувач може встановити його на будь-який гаджет, отримувати повідомлення і працювати з ним (навіть без інтернет-з'єднання). Це вже реальна технологія, яку активно просуває Google. В цій статті проаналізуємо її в деталях [4, 5].

Progressive Web Apps (PWA) Google анонсував ще в 2015 році. Цей формат створення мобільних сайтів привернув увагу завдяки відносній простоті розробки і майже миттєвій взаємодії з користувачем. Уже в травні 2016 на конференції розробників Google I / O The Washington Post продемонстрував свій мобільний гібридний сайт-додаток.

З'ясуємо детальніше, що саме являє собою PWA [3]. Це назва групи додатків, які використовують стек Web-технологій (JS + HTML + CSS) і дозволяють поєднати простоту використання Web сайту зі специфічними для програмних додатків операційної системи інтерфейсом і технічними можливостями.

Основне призначення PWA – збільшити конверсію, кількість користувачів і зручність використання Web-додатків на мобільних пристроях.

Progressive Web Apps є логічним продовженням Accelerated Mobile Pages. Таким чином, якщо ви раніше створювали AMP додатки, то вам однозначно варто оновити їх до норм PWA додатків. Якщо ви до цього нічого не чули про AMP, то це не стане для вас проблемою під час вивчення PWA.

Аналіз досліджень. Якщо у вас є смартфон, подивіться на іконки-квадрати на головному екрані. Вони називаються «нативними» або «рідними додатками». «Нативні» вони тому, що розроблені для операційної системи вашого смартфона (будь-то iOS або Android). Наразі створений прогресивний веб-додаток, який виглядає і поводиться так само, як мобільний додаток. А це означає, що його можна додати до головного екрана смартфона, йому дозволяється відправити push-повідомлення, отримувати доступ до апаратних засобів пристрою і працювати в автономному режимі. Progressive Web App працює так само стабільно при нестійкому з'єднанні або за відсутності мережі, так як це було б з повним доступом в Інтернет. Як же браузер може відкрити веб-сайт, не маючи доступу до інтернету, запитаєте ви? Вірите чи ні, ваш браузер тепер здатний на багато цікавих функцій, яких ви б не очікували всього пару років тому. Сайти, подібні whatwebcando.today, здатні аналізувати API вашого браузера і показувати, які з функцій доступні на мобільних пристроях і підтримуються браузером.

Припустимо, ваш браузер підтримує всі ці функції. Але в смартфонах так багато нативних додатків, які використовуються щодня, що люди не зможуть просто кинути все це і переключитися на PWA. Але, ймовірно, і тут ми помиляємося. Дослідження, проведене в 2015 році marketingland.com показало дивовижну статистику: мобільні користувачі витрачають 80% часу на своїх пристроях, використовуючи тільки три пріоритетних нативних додатки. Отже, безліч нативних додатків не використовувалися. Доводиться проходити процедуру скачування, а в подальшому видалення додатків, які не стали актуальні для вас з часом. Пріоритетними для більшості з нас залишаються кілька мобільних додатків, такі як Facebook, Instagram, поштовий додаток або інші. Кількість завантажень нових нативних додатків з року в рік падає. За останні роки вона впала на 20% і ця цифра продовжує збільшуватися. У 2016 році число завантажених додатків стало менше, ніж число віддалених.

Формулювання цілей статті. Мета дослідження – огляд та аналіз нових можливостей мобільного інтернету при створенні та використанні прогресивних веб-додатків.

Виклад основного матеріалу дослідження. Але що насправді являють собою PWA? Чи потрібно

вам такий додаток? І, якщо ви його створите, як забезпечити йому високі позиції в пошуковій видачі? Отже, таке поняття, як «Прогресивний веб-додаток» є трохи розпливчатим і дещо суперечливим. Але в цілому, ідея полягає в тому, що веб-сторінка з відповідними модифікаціями згідно зі стандартом розробленим Google, поводилась, як звичайна програма встановлена з App Store. Спочатку сторінка відкривається, як зазвичай у вікні браузера, але якщо вона володіє функціоналом PWA, користувач зможе дозволити браузеру «Додати на робочий стіл» цю сторінку. Раніше даний функціонал використовувався в якості закладок.

Коли встановлений таким чином веб-додаток буде запущено з робочого столу, інтерфейс браузера буде захований, а сторінка відкриється як звичайно встановлений додаток. Отже, PWA є спробою створити баланс між інтернетом і нативним середовищем.

«Progressive Web Apps» повноцінно використовують сучасні можливості Інтернету і надають користувачеві відчуття роботи з додатком. Цікавою властивістю PWA є те, що завдяки їм відпадає потреба створювати додатки. Мобільна версія вашого сайту сама стає додатком. Ось недавно, наприклад, ми з колегами вели досить цікаву дискусію на тему того, що сьогодні потрібніші бренду: сайт з додатком або PWA.

При цьому враховувалася можливість надсилати повідомлення, синхронізація, робота в режимі оф-лайн, інтерфейс, що створює враження "рідного" додатка, а також опція встановлення ярлика на робочому столі пристрою. Ці можливості були раніше недоступні для сайтів. Але завдяки тому, що нові браузери підтримують HTML5 і JavaScript, ми можемо приступати до створення такого функціоналу.

За інформацією Google PWA включають в себе дві складові: Service Workers і Application Shell Architecture (архітектура оболонки додатку). Розглянемо детальніше ці дві складові додатку.

Одна з найважливіших проблем, від якої страждали користувачі веб-додатків – це робота в умовах втрати зв’язку. Найкращий в світі веб-додаток забезпечить жахливий користувальницький досвід, якщо ви не зможете його завантажити. Робилося багато спроб створення технологій, які б вирішили цю проблему.

Попередньою спробою була технологія AppCache, і вона здавалася гарною ідеєю, тому що дозволяла дійсно просто вказати ресурси для кешування. Однак, ця технологія робить багато припущень про те, що ви намагаєтеся зробити і потім не спрацьовує, коли ваш додаток працює не в точності з цими припущеннями.

Технологія Service Workers повинна в підсумку вирішити проблеми, як спіткали AppCache. Синтаксис Service Worker складніший, ніж той же AppCache, але компромісом є те, що ви можете, за допомогою JavaScript, контролювати AppCache; це дозволяє прогнозувати поведінку додатку з високим ступенем деталізації, що дозволяє вирішувати проблеми кешування. Використовуючи Service Worker ви можете без зусиль отримати додаток, використовуючи, в першу чергу, кешовані ресурси, представляючи тим самим поведінку за замовчуванням в автономному режимі, до того як буде отримано по мережі більше даних (такий підхід називається Offline First). Так зазвичай працюють нативні додатки, що часто є причиною вибору користувача на їх користь.

Service worker це подієво-керований процес, що реєструється на рівні джерела. Він приймає форму JavaScript-файлу, який може контролювати веб-сторінку / сайт, з яким він асоціюється, перехоплювати і модифікувати навігацію та запити ресурсів, дуже докладно кешувати ресурси, й так само надавати повний контроль над тим, як додаток поводиться в ситуації, коли мережа недоступна.

Service worker запускається в контексті workera, тому він не має доступу до DOM і запускається в окремому потоці від основного JavaScript, який керує вашим додатком так, що не блокує його. Він покликаний бути повністю асинхронним і, як наслідок, API, такі як синхронні XHR і localStorage, не можуть бути використані в service worker.

Service workers запускаються тільки поверх HTTPS з міркувань безпеки. Оскільки мати відкриті широкій публіці мережеві запити може бути вкрай небезпечно і призвести до атак.

Коли користувач вперше запросить доступ до сайту / сторінки, контрольованої server worker, той моментально буде завантажений та спочатку реєструє себе. Якщо реєстрація пройшла успішно, service worker буде завантажений клієнтом і спробує встановитися / активуватися для всіх URL, доступних користувачеві, або підмножини, зазначеної ним. Після цього він буде завантажуватися кожні 24 години або близько того. Він спробує встановитися заново, якщо процес буде визнаний новим, або відмінним від існуючого service worker (визначається на основі побайтового порівняння).

Якщо вже існують доступні service worker, нова версія встановлюється у фоновому режимі, але буде все ще не активна – в даний момент вона буде називатися worker в очікуванні. Він активується тільки тоді, коли більше немає інших сторінок для завантаження, та все ще використовують старий service worker. Як тільки таких сторінок більше не залишиться, новий service worker активується (стане активним worker).

Визначимо основні моменти застосування Service workers:

- фонова синхронізація даних;
- відповідь на запити від зовнішніх джерел;
- отримання централізованого оновлення для даних, складних для розрахунків, таких як геолокація або гіроскоп;
- збірка клієнтської частини і управління залежностями для CoffeeScript, less, CJS / AMD модулів розробки;
- поліпшення продуктивності, наприклад, за рахунок попереднього завантаження ресурсів, які знадобляться користувачу в найближчому майбутньому (підвантаження кількох наступних картинок в фотоальбомі);
- реакції на вхідне повідомлення: запускає service worker для відправки повідомлень користувачам, щоб оповістити їх про надходження нового контенту.

В майбутньому service workers будуть здатні на багато більше корисних речей для web-платформ, наблизивши їх до функціонування нативних додатків.

Другою частиною прогресивного веб-додатку, як було зазначено вищє, є Application Shell Architecture (архітектура оболонки додатку) – це мінімальний набір HTML, CSS і JavaScript, необхідних для відображення головної сторінки додатку.

Оболонка додатку (Application Shell) є секретом надійної продуктивності. Уявіть, що оболонка додатку – це пакет, який ви опублікували б в магазині додатків, якби розробляли «рідний» додаток. Інтерфейс користувача при цьому залишається локальним, а контент динамічно завантажується через API.

Цей метод завантаження контенту надає неймовірно високу швидкість прийому даних. Ми можемо практично моментально відобразити перед очима користувача то, як виглядає наш сайт але без контенту. Потім сторінка завантажить контент і все готово.

Коли ви заходите в Інтернет і відкриваєте веб-сайт, ви чекаєте завантаження всієї головної сторінки. Це включає в себе не тільки динамічний контент сторінки, але і всі зображення, шрифти, таблиці стилів, JavaScript, що використовуються на сторінці і більшість з них залишаються незмінними незалежно від того, скільки разів ви відкриваєте сайт. Так чому б не кешувати все це? Коли PWA запускається вперше, воно поміщає всі статичні ресурси і оболонку додатку в кеш. Наступного разу, коли додаток буде запущено, воно підтягне статичну інформацію додатку безпосередньо з кешу, що значно зменшить час умовного завантаження для користувача. Якщо ви коли-небудь намагалися відкрити веб-сайт не в 3G-з'єднанні, ви зрозумієте, що я маю на увазі.

Окрім кешування завантажень PWA керують також відповіді. Це, можливо, найпотужніша річ, на яку здатні PWA. Вони можуть кешувати не тільки статичні компоненти оболонки додатку, а й цілі відповіді з GET-запитів. Припустимо, ви вчора відвідали новинне PWA, щоб прочитати новини. Якщо ви відкриєте його сьогодні, миттєво отримаєте новинний канал вчорашнього дня, доки додаток завантажує новий контент в фоновому режимі, динамічно впроваджуючи його в канал, який ви вже переглядаєте. Якщо ви не можете отримати свіжий контент, наприклад, тому, що перебуваєте в автономному режимі, то залишитеся з вчорашнім каналом, але принаймні не отримаєте ніяких помилок. Існують різні алгоритми кешування, які реалізуються в залежності від мети застосування.

Розглянемо ці алгоритми:

- Cache with fallback to network – «кеш з резервом для мережі». Використовується, якщо ви створюєте автономний додаток. Якщо відповідь вже знаходиться в кеші, вона буде передана користувачеві, і онлайновий запит ніколи не буде виконано. Якщо відповідь ще не кешували, додаток спробує завантажити її он-лайн і потім помістить в кеш. Цей підхід слід використовувати для контенту, який змінюється дуже рідко або не змінюється взагалі;
- Network with fallback to Cache – «Мережа з відкотом до кешу». Це підхід, при якому он-лайн користувачі завжди отримують актуальну он-лайн-версію, а автономні користувачі отримують кешовану версію. Слід використовувати його для ресурсів, які часто оновлюються;
- Cache and Network race – «Кеш і мережева гонка». Це коли ви шукаєте відповідь в кеші, одночасно запрошуючи он-лайн-контент. Спочатку ви показуєте кеш відповідь користувача, а потім замінюєте його новим контентом відразу після його появи, або додаєте новий контент поверх кешованих сторінок, таких як Facebook і Twitter.

Коротко розглянемо процес інсталяції прогресивного веб-додатку на пристрій. По суті, встановлення веб-додатку – це додавання «закладки» на домашній екран або в програму запуску додатків. Є деякі досить очевидні речі, які ви, як розробник, повинні надати браузеру, щоб той міг вважати сайт додатком: назва, іконки – тобто ті атрибути, що наявні й в нативного додатку. Всі ці дані пристрій зчитує з маніфесту додатку.

Специфікація маніфесту пропонує вам стандартний спосіб зробити це за допомогою файлу JSON. Просто зробіть посилання на файл маніфесту в HTML-сторінці наступним чином:

```
<link rel="manifest" href="/manifest.json">
```

Маніфест веб-додатку надає інформацію про додаток у форматі JSON-файлу. Мета маніфеста – встановити веб-додаток на домашній екран пристрою, надаючи користувачеві більш швидкий доступ і більше можливостей.

Маніфест веб-додатку є частиною колекції веб-технологій поряд з іншими потужними можливостями, такими як доступ до додатка в режимі оф-лайн і попередженням користувача за допомогою push-повідомлень про зміну вмісту додатку. Наведемо типовий приклад маніфесту веб-додатку:

```
    {
"lang": "ua",
"dir": "ltr",
"name": "Повна назва веб додатку",
"description": "Опис веб-додатку
"short_name": "Коротка назва",
"icons": [{
    "src": "icon/lowres.webp",
    "sizes": "64x64",
    "type": "image/webp"
{
    "src": "icon/hd_hi",
```

```
        "sizes": "128x128"
    }],
    "scope": "/test/",
    "start_url": "/test/start.html",
    "display": "fullscreen",
    "orientation": "landscape",
    "theme_color": "aliceblue",
    "background_color": "red",
    "screenshots": [{
        "src": "screenshots/test.jpg",
        "sizes": "640x480",
        "type": "image/jpeg"
    }
}
```

Розглянемо більш детально основні ключі маніфесту. По-перше, нашому додатку потрібна справжня назва. Для цього використовуються ключі name і short_name.

```
{
    "name": " Повна назва веб-додатку ",
    "short_name": "Коротка назва"
}
```

Ключ short_name служить назвою додатку при відображенні в умовах обмеженого простору (наприклад, під значком на домашньому екрані телефону). Ключ name може бути трохи довший, відображаючи назву програми повністю. Також він служить додатковою інформацією для користувача, який шукає ваш додаток на телефоні. Так що набравши «Повна» або «назва веб-додатку», користувач зможе знайти додаток на своєму пристрої.

Якщо ви не вкажете назву, то браузер може використовувати <meta name = "application-name"> , або дані елементу <title>. Але будьте уважні: деякі браузери можуть вимагати вказати назву по іншому, ваш додаток може втратити статус «прогресивний веб-додаток».

Замість звичайної іконки браузера, у вашого веб-додатка повинна бути іконка, яка буде з ним асоціюватися. Для цього в маніфесті є ключ icons. Він приймає список іконок, їх розмірів і форматів. Це робить процес вибору іконки дуже ефективним, оскільки у них з'являється адаптивне рішення, яке дозволяє уникнути непотрібних навантажень і допомагає іконці завжди виглядати відмінно на широкому діапазоні пристроїв й розширень екрану.

Якщо ви не вкажете ключі іконок, браузер буде шукати запасні варіанти: <link rel = "icon">, <favicon.ico> або, якщо не знайде їх, може навіть використовувати скріншот вашого сайту.

Додатки при запуску повинні мати можливість контролювати своє відображення на екрані. Якщо це гра, то їй, ймовірно, потрібно бути в повноекранному режимі і в горизонтальній орієнтації. Для цього формат маніфесту надає вам два ключа.

```
{
    "display": "fullscreen",
    "orientation": "landscape"
}
```

Іноді під час запуску програми вам потрібно, щоб користувач завжди потрапляв на певну сторінку. Ключ start_url дає можливість це вказати.

```
{
    "start_url": "/start.html"
}
```

Нативні додатки мають чіткі межі: як користувач, ви впевнені, що коли ви відкриваєте нативний додаток, він не відчинить заборонені дії непомітно для вас. Найчастіше вам гранично ясно, що ви переключилися з одного нативного додатку на інший. Зазвичай ці візуальні підказки надає операційна система. З Інтернетом все інакше: це величезна гіпертекстова система, в якій веб-додаток може охоплювати кілька доменів: ви можете з легкістю перейти з gmail.com на docs.google.com і користувач навіть цього не помітить. На практиці, ідея існування кордонів додатків є абсолютно непристосованою для вебу.

В Інтернеті ми знаємо, що покидаємо область однієї програми та переходимо до іншої тільки завдяки веб-дизайнерам, які були досить добрі, щоб зробити їм унікальний помітний дизайн. У випадках, коли це не так, безліч користувачів виявляються обмануті сайтами, що маскуються під інші.

Формат маніфесту вирішує цю проблему, дозволяючи вказувати «область адреси» для застосування. Ця область вказує межі для застосування. Це може бути або домен, або директорія на цьому домені та більш складні функції, які можуть вам стати в нагоді, наприклад, можливість вказати бажану орієнтацію пристрою і чи потрібен вам повноекранний режим.

Як й інші веб-ресурси, маніфест веб-додатку повинен бути доступний для будь-якого веб-браузера або пошукового робота. Якщо розробник веб-додатку хоче сповістити пошукових роботів про заборону на сканування файлу, він може зробити це включивши маніфест веб-додатку в файл robots.txt. Це описано докладніше в протоколі robots.txt.

Отже, ви в захваті від ідеї прогресивного веб-додатку. Але якщо ви створите його, як забезпечити йому високі позиції? Як і з будь-якою новою фронтенд-технологією, тут виникають питання з SEO-видимістю.

Існує кілька проблем, з якими ви можете зіткнутися, якщо плануєте побудувати сайт з використанням архітектури Application Shell. По-перше, вам фактично доведеться використовувати той чи

інший JS-фреймворк або бібліотеку, таку як Angular або React. В цьому випадку вам не завадить вивчити деякі SEO-поради, що стосуються Angular.JS або React. Якщо ви використовуєте щось інше, буде необхідно попередньо візуалізувати сторінки на сервері, а потім зчитувати їх через додаток, коли вони завантажаться. Це дозволить вам використовувати все найкраще, що є в цих інструментах, при цьому надаючи дані, які будуть розпізнаватися Google і іншими пошуковими системами. Незважаючи на недавнє твердження Google, що вони вдосконалюють візуалізацію додатків подібного типу, на практиці ми все ще зустрічаємо безліч прикладів збою при зборі «важких» JS-даних.

Висновок. Припустимо, що ви приєдналися до світу просунутих «фронтендових» JS-технологій, тоді для дії за принципом PWA вам буде потрібно використовувати CSS і JS, необхідні для роботи сторінки, поряд з HTML. Тобто не просто включати теги <script> з атрибутом <code> src, а вбудовувати весь файл.

Зрозуміло, це означає, що ви збільшите розмір сторінки, але, з іншого боку, сторінка буде завантажуватися моментально. Більш того, при моментальному надання всіх JS (необхідних для зчитування) і CSS (необхідних для надання сенсу дизайну), браузер зможе візуалізувати ваш контент та забезпечити його коректне відображення й швидку роботу.

Одна з переваг Progressive Web App полягаю в тому, що його дуже легко виявити, як звичайний веб-сайт – ви знайшли його у пошуковому сервісі, клацнули посилання, щоб відкрити і все, у вас є додаток на пристрої, готовий до використання. При цьому браузер сам запропонує вам додати іконку на робочий стіл. Якщо ви згодні з цим, ви побачите значок нового додатку на головному екрані телефону, перебуваючи поруч з рідними додатками.

При наявності певних складнощів прогресивні веб-додатки мають значну більшість переваг. Так само як і з пошукових систем користувачі можуть переходити на прогресивні програми з посилань в соцмережах під час перегляду контенту, або, безпосередньо, з пошукової видачі соцмережі. Погодьтеся, це набагато зручніше, ніж конкурувати за перегляди з двома мільйонами доступних додатків на IOS App Store або Google Play Store.

Пропозиція встановити прогресивний додаток показується тільки тоді, коли веб-додаток відповідає певним критеріям і користувач продемонстрував інтерес за допомогою повторного відвідування сайту.

Встановлення додатку відбувається миттєво. Всі компоненти, які вимагають тривалого завантаження, вже були встановлені в кеш при першому відвідуванні сайту користувачем.

Прогресивні додатки значно менші за розміром, так як вони ефективно використовують можливості браузера. Спливаючі повідомлення, робота в автономному режимі та багато інших функцій прогресивного додатку будуть працювати, навіть якщо відвідувач ніколи його не встановлював.

Отже, визначимо області, де використання прогресивного веб-додатку надає найбільші переваги в порівнянні з нативними додатками та веб-ресурсами:

- контент, який регулярно оновлюється, на кшталт біржових зведень, швидко мінливих цін або рівня запасів, тощо;
- чат або платформа коментарів з необхідністю оновлення даних, а також повідомлень про нові повідомлення;
- аудиторія, якій властиво витягувати дані, а потім завантажувати їх в оф-лайн режимі, по типу новинних програм або блогу, який публікує багато статей в день;
- сайт з регулярно оновлюваним контентом, який користувачі можуть перевіряти по кілька разів на день.

З розвитком концепції PWA, веб-розробники зможуть швидко створювати та розгортати додатки, які виглядають і працюють однаково добре на всіх платформах.

Література

1. Пасічник В.В. Глобальні інформаційні системи та технології (моделі ефективного аналізу, опрацювання та захисту даних) / Пасічник В.В., Жежнич П.І., Кравець Р.Б., Пелещишин А.М. Тарасов Д.М. – Львів : Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 350 с.

2. Особливості web-додатків [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://sites.znu.edu.ua/webprog/lect/1191.ukr.html

3. Прогресивна завантаження web-додатків [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://it-ua.info/news/2016/08/15/progresivna-zavantazhennya-web-dodatkv-za-dopomogoyu-podlu-kodu.html

References

1. Pasichnyk V.V. Hlobalni informatsiini systemy ta tekhnolohii (modeli efektyvnoho analizu, opratsiuvannia ta zakhystu danykh) / Pasichnyk V.V., Zhezhnych P.I., Kravets R.B., Peleshchyshyn A.M. Tarasov D.M. – Lviv : Vyd-vo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika", 2006. – 350 p.

2. Features of web-applications [Electronic resource]. - http://sites.znu.edu.ua/webprog/lect/1191.ukr.html

3. Progressive download of web-applications [Electronic resource]. – http://it-ua.info/news/2016/08/15/progresivna-zavantazhennya-web-dodatkv-za-dopomogoyu-podlu-kodu.html

Рецензія/Peer review : 09.09.2017 р. Надрукована/Printed :25.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 629.735.051:004.7 (043.3)

В.О. ЗАРУЦЬКИЙ
Державний університет інфраструктури та технологій, Київ
О.С. ТОРОШАНКО
Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова

КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ПРИ ПЕРЕДАВАННІ ДАНИХ У МЕРЕЖАХ РАДІОДАТЧИКІВ

Розглянуто мережу радіодатчиків (безпроводову сенсорну мережу) з випадковим неконтрольованим зсувом параметрів окремих датчиків. Для усунення обмежень детерміністського підходу при автоматичному калібруванні датчиків застосовано метод керованої спрямованої дифузії, заснований на теорії керованих Марковських процесів. Для оцінки дрейфу параметрів датчиків у реальному часі пропонується використовувати фільтри стеження та багатоканальні безпошукові фільтри. Отримані оцінки використовуються для корекції в якості зворотного зв'язку для наступного кроку оцінки.

Ключові слова: *мережа радіодатчиків, безпроводова сенсорна мережа, калібрування датчиків, метод керованої спрямованої дифузії, Марковський процес, фільтри стеження.*

V.O. ZARUTSKYI
State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv
O.S. TOROSHANKO
O. S. Popov Odesa National Academy of Telecommunications

COMPENSATION OF ERRORS AT DATA TRANSMISSIONIN IN RADIOSENSOR NETWORKS

The radiosensor networks of (wireless sensor network) with random uncontrolled shift of parameters of separate sensors is considered. To eliminate the limitations of the deterministic approach in the automatic gauge of sensors, the method of controlled directed diffusion, based on the theory of controlled Markov processes, is applied. The main idea of the solution is to evaluate the changes of the state vector with the displaced components, that is, in assessing not only the measurement results, but also the drift of the parameters of the meter (for example, the coordinates of its placement or the remainder of the battery charge). In order to evaluate the drift of real-time sensor parameters, it is proposed to use both tracking filters and multi-channel (non-search) filters that are synthesised on the basis of drift models of sensor parameters. The estimates obtained are used for correction as feedback for the next step of the assessment. The given methodology provides an effective solution to the problem of auto-calibration of sensors in wireless sensor networks.

Keywords: *radiosensor network, wireless sensor network, gauge of sensors, method of the guided directed diffusion, Markov process, tracker filters.*

Вступ. У представленій роботі розглянуто безпроводову сенсорну мережу (БСМ) з низькою швидкістю передачі даних і наднизьким енергоспоживанням. При цьому необхідно враховувати, що швидкість передачі і споживання енергії пов'язані між собою обернено пропорційною залежністю, а мережні елементи не обслуговуються після розгортання і не мають поновлюваних джерел живлення. Крім того, смуга пропускання радіоканалу мережі радіодатчиків є досить вузькою за визначенням. Тому для розширення діапазону швидкостей передачі даних з урахуванням накладення обмежень на витрату енергії необхідно, з одного боку, розпаралелювати потік даних, а, з іншого – мінімізувати число паралельних маршрутів передачі від вузлів-джерел до точки збору інформації.

У більшості мереж з енергозбереженням застосовується традиційна клієнт-серверна технологія, коли кожен мережний вузол (радіодатчик) відсилає зібрані дані в центр збору і обробки. Очевидно, потоки даних двох близько розташованих вузлів можуть бути корельовані, причому ступінь кореляції зменшується зі збільшенням відстані між вузлами. Тому актуальним завданням збору даних сенсорних мереж з щільним покриттям території є оптимізація трафіку шляхом декореляції, тобто усунення надмірності.

Другою важливою проблемою БСМ з не поновлюваними (одноразовими) датчиками є повільний дрейф параметрів, який поєднується з раптовими неконтрольованими зсувами [1]. Зсув і дрейф (систематичні похибки) впливають на ефективність систем підтримки прийняття рішення. Калібрування датчиків для урахування цих похибок – коштовний і тривалий процес. Звичайно такі похибки корегуються на місці: відкалібрований датчик використовується для калібрування інших датчиків. Ця трудомістка робота проводиться вручну, і її проведення можливе тільки для обмеженої кількості датчиків і порівняно нечасто. Для БСМ (мереж радіодатчиків) великого масштабу, що містять велику кількість дешевих датчиків, калібрування необхідно проводити досить часто. Вручну проводити калібрування датчиків у такій мережі практично нереально. Отже, необхідно розробляти методи автоматичного калібрування датчиків у сенсорних мережах.

Проблема дрейфу параметрів датчиків і його вплив на роботу мережі вирішується в припущенні, що на сусідні датчики, що розташовані в порівняно малій околиці, надходять корельовані дані. Більше того, фізичні процеси, про які датчики збирають інформацію, можуть бути просторово корельованими. Отож, у принципі можна передбачати дані одного датчика, використовуючи дані від інших близько розташованих датчиків. Ці передбачувані дані забезпечують належний базис для корекції аномалій у результатах вимірів датчиків. При цьому важливо розрізняти задачу обробки результатів вимірювань датчиків або представлених даних, що містять похибки зсуву і/або дрейфу, і правильного знімання даних шляхом

застосування алгоритмів корекції похибок. Завдяки ранньому виявленню аномалій в даних, що отримуються, можна не тільки виявляти дрейф параметрів датчиків, але й своєчасно корегувати його.

Основна ідея рішення полягає в оцінці змін вектору стану зі зміщеними компонентами. Інакше кажучи, завдання полягає в тому, щоб оцінювати не тільки результати вимірів, але й дрейф параметрів вимірювача (наприклад, координат його розміщення). Для оцінки дрейфу параметрів датчиків у реальному часі пропонується використовувати фільтри стеження і моделі дрейфу датчиків. Отримані оцінки використовуються для корекції в якості зворотного зв'язку для наступного кроку оцінки. Надана методика дає ефективне вирішення завдання автокалібрування датчиків у БСМ.

Стан проблеми. Пряме рішення завдання калібрування зсуву – застосовувати тестові сигнали та вимірювати відгук мережі. Результат порівняння очікуваного і поточного відгуків можна використовувати для відшукання зсуву і розкиду для випадку лінійного дрейфу [2]. Цей метод в [3] названо спрямованим калібруванням, тому що для калібрування датчиків використовується дійсне значення параметра. Інший спосіб спрямованого калібрування – це ручне калібрування сегмента БСМ, після чого дані не відкаліброваних датчиків узгоджуються з даними сегмента, де проведене калібрування. Сегмент мережі з відкаліброваними датчиками дає опорні дані для калібрування інших датчиків [1].

Однак розглянуті методи непрактичні і коштовні для мереж великого масштабу.

Задача калібрування сенсорної мережі розглядалася в [4] у іншій постановці. Припустимо, що після калібрування датчиків перед їх розміщенням в мережі похибка вимірювання за допомогою датчика змінюється за лінійним законом із певною швидкістю та постійною складовою, своєю для кожного датчика. Розроблено метод оцінки параметрів лінійної функції із застосуванням узгодженості тільки результатів вимірювань датчиків у сегменті мережі. При цьому для отримання порівняльних оцінок нема потреби у вимірюванні дійсних вихідних параметрів. По суті, по даному методу здійснюється пряме калібрування датчиків сенсорної мережі. Тут не потрібно щільно розміщувати датчики області, що нас цікавить, або використовувати тестові сигнали. Однак необхідно, щоб дані, що знімаються датчиками в межах обраної області розміщення, мали достатню просторову кореляцію.

При теоретичному аналізі не враховувалися шуми, а калібровані функції вважалися лінійними. Тому рішення при наявності шуму може бути нестійким. Якщо метод застосовується у випадку, коли співвідношення між виміряними та дійсними даними є нелінійним, отримані оцінки можуть бути помилковими. Представлені тут розрахунки показують, що метод краще працює в БСМ із інфраструктурою.

При прямому калібруванню датчиків у БСМ передбачається, що датчики в розглянутій мережі розташовані досить щільно. Внаслідок цього у вимірюваних даних спостерігається висока кореляція. У припущенні сильної кореляції сигналів від сусідніх і близько розташованих датчиків можна враховувати тільки кореляцію за часом. Для одержання функцій зсуву вимірюються амплітуди сигналів.

Задачу калібрування в сенсорних мережах необхідно розглядати як задачу статистичного оцінювання параметра в масштабах мережі. Таким чином, замість калібрування кожного датчика для оптимізації окремого результату виміру, датчики мережі калібрують для оптимізації повного відгуку мережі. У методі загального калібрування відкалібровані датчики розглядаються в загальному керованому середовищі. Метод був випробуваний на мережі AdHoc і дав зменшення похибки вимірювання дальності з 74,6% до 10,1% [5]. Автори стверджували, що об'єднаний метод калібрування може бути модифікований для автокалібрування БСМ у некерованому середовищі, де дійсне значення вимірювання невідомо. Показано, що задача зводиться до задачі квадратичного програмування. Також у [5] розглядалося пряме калібрування ряду вимірів для локалізації датчиків з використанням загальної енергії сигналу й/або затримки у часі.

У роботі [6] вирішувалась задача скорочення неоднозначності в результатах вимірів датчиків. Для очищення зашумлених даних і зменшення впливу випадкових похибок у вимірах датчиків у БСМ був використаний Байєсівський підхід. При цьому не враховувалися систематичні похибки. Метод був застосований для мережі із централізованою архітектурою на модельному наборі даних і показав добрі результати.

При реалізації методу прямого калібрування датчиків у сенсорній мережі [4] використовувався набір фільтрів Калмана, щоб уточнити значення, обмірювані датчиками. Для керування рівнянням стану використовувалася фізична модель вимірюваного параметра, що застосовується в екології та проектуванні споруд. Передбачалося, що виміри пов'язані з дійсним значенням через певний зсув і коефіцієнт нахилу. Вектор стану змінювався відповідно до параметрів калібрування, а потім оцінювалися зсув і коефіцієнт нахилу, щоб відновити правильність результатів вимірів.

Інший метод виявлення похибок і несправностей датчика, який є частиною автоматичної системи (типу проводової сенсорної мережі), запропонований в [7]. За результатами вимірів, що надходять, створювалася модель поведінки датчика. Потім вона оптимізувалася на основі алгоритму максимуму правдоподібності. Результати вимірів порівнювалися з моделлю. У випадку, якщо відхилення результату виміру датчика від модельованого значення перевищувало певний поріг, система фіксувала цей результат як помилковий. З іншого боку, при малих відхиленнях, що не перевищують поріг, система автоматично підбудовувалася. Це зробило систему здатною адаптуватися до повільного дрейфу.

У роботі [8] для виявлення аномалій і помилкових даних сенсорної мережі використовувався метод лінійної регресії у просторі станів [9]. Дані, обмірювані датчиками, відображалися із простору вхідних

сигналів (простір, де спостерігаються особливості) у простір особливостей (простору більшої розмірності) з використанням ядра рівняння. Проектовані дані класифікувалися в кластерах. Дані точок, які не укладалися в норми, вважалися помилковими. Датчик, який завжди давав помилкові дані, вважався таким, що вийшов з ладу.

В [10] описаний метод моделювання даних у БСМ. Для прилаштування апроксимуючих функцій до даних, обмірюваних датчиками на інтервалі спостереження, використовувалася лінійна регресія. Датчики настроювалися на використовувані базисні (вагові) функції. Таким чином, якщо датчик знав вагові функції його сусіда, він міг відповісти на запит про сусіда протягом інтервалу спостереження. Тому при пересиланні вагових функцій замість пересилання обмірюваних даних цілого інтервалу спостереження від одного датчика до іншого значно скорочується обсяг обміну даними на верхніх рівнях мережної ієрархії. Це було однієї із цілей методу. Інша ціль – надати можливість якому-небудь датчику в мережі оцінити обмірювану змінну в точках у межах мережі, де не було ніяких датчиків, з використанням просторової кореляції між датчиками.

Додатком методу є розрахунки контурних рівнів обмірюваних значень [10]. Навіть при ненадійному зв'язку між датчиками й наявності шумів у зчитуваних даних це не приводить до систематичних похибок (дрейфу й зсуву). Наявність таких похибок викликала б необхідність постійної корекції модельних функцій для одержання оцінок, які відхиляються від дійсних вихідних значень.

Крім доброї здатності до розширювання, високоточних оцінок і адаптації, механізми векторної підтримки використовуються в інших додатках для прогнозування та оцінювання фізичних параметрів аналізованих явищ і процесів [11]. Для прогнозування результату виміру, на додаток до методу простору станів, у певні моменти часу (щораз, коли проводилися виміри), був використаний фільтр Калмана [12]. Це дає змогу витримувати точність прогнозованих значень близько до вимірів, узятих на точці знімання даних, і зменшувати похибки прогнозування.

Структура мережі та постановка завдання. Розглянемо БСМ із великим числом датчиків, розподілених за випадковим законом в обмеженій області поверхні (рис. 1). Датчики групуються в сегменти (кластери) по ступеню близькості розташування один від одного. Кожний датчик вимірює заданий параметр в області розміщення, наприклад, температуру навколишнього середовища, концентрацію певної хімічної речовини, рівень шуму або атмосферний тиск тощо. Передбачається, що результати вимірів є просторово-часовими функціями.

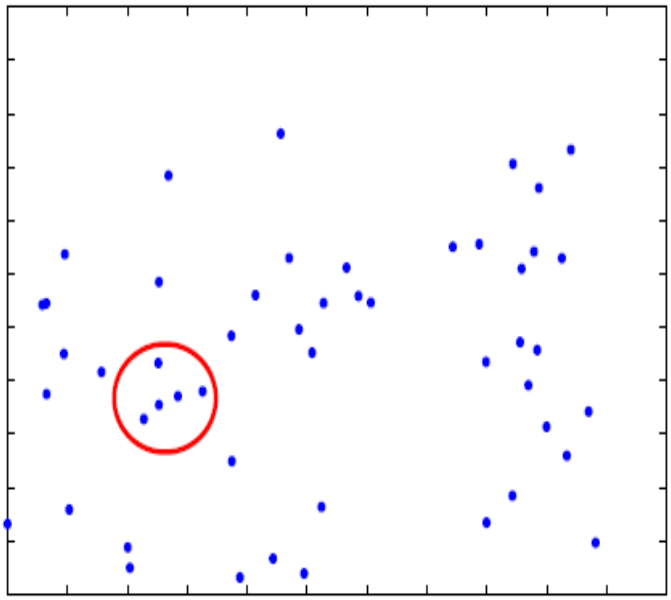


Рис. 1. Схема розміщення датчиків БСМ

У принципі результати вимірів датчиків, розташованих усередині того самого сегмента, можуть відрізнятися один від одного. Наприклад, датчик, розташований близько до джерела тепла або освітлюваний сонцем, дасть більш високі результати вимірів, чим інший датчик, що перебуває в тіні або на більшому видаленні від джерела тепла. Передбачається, що датчики, що перебувають усередині сегмента, можуть обмінюватися між собою даними вимірів. Із часом у деяких вузлах при зніманні даних може мати місце дрейф параметрів. При перевищенні деякого рівня величини дрейфу дані, що отримуються від мережі, стають недостовірними. Для того, щоб пом'якшити проблему дрейфу, у кожному датчику мережі необхідно виявляти та корегувати власний дрейф, використовуючи зворотний зв'язок за даними від сусідніх вузлів. Це пов'язано з тим, що дані від вузлів у межах деякої околиці (кластера), корельовані, у той час як кореляція похибок або дрейфу практично відсутня. При виявленні та своєчасній корекції дрейфу параметрів можна добитися збільшення ефективної тривалості життєвого циклу мережі.

Другий тип похибок – детермінований зсув, який може спостерігатися в деяких вузлах. Є чітка

відмінність між цими двома видами похибок. Перші змінюються в часі досить швидко і часто впливають, у той час як другі дають постійну початкову помилку. Ця похибка звичайно викликається можливим виробничим дефектом або похибками калібрування.

Розглянутий тут дрейф – це повільний гладкий дрейф, який моделюється лінійною, поліноміальною, гармонійною, експонентною функціями або їх комбінаціями. Він залежить від умов застосування і в основному пов'язаний з виробничими дефектами датчика. Дуже малоймовірно, що два електронні вузли мають однакові або схожі дефекти, якщо тільки вони не є елементами однієї інтегральної схеми. Передбачається, що параметри дрейфу одного датчика відрізняються від відповідних параметрів дрейфу іншого датчика, що знаходиться поруч із ним в одній околиці.

Модель дрейфу можна описати поліноміальним, експонентним або гармонійним трендом.

Вираз для поліноміального тренда запишемо в наступному вигляді:

$$\varphi_p(t) = \varphi_0 + at + bt^2 + \sigma\varphi(t_i), \quad (1)$$

де $\sigma\varphi(t_i)$ – дискретний білий Гаусівський шум; a і b – постійні коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом; φ_0 – точне значення параметра.

Вираз для експонентного тренда має вигляд:

$$\varphi_{\exp}(t) = \varphi_0 + k\left\{1 - \exp\left[\varphi(t_0 - t) + \xi\varphi(t)\right]\right\}, \quad (2)$$

де k – масштабний коефіцієнт; t_0 – момент початку дрейфу параметрів.

Тригонометричний тренд описується виразом виду:

$$\varphi_{tr}(t) = \varphi_0 + \sum_{l=1}^{N} k_l \sin(l\omega_0 t) + \xi\varphi(t), \quad (3)$$

де $k_l = k_0 / l$ або $k_l = k_0 \exp(-l^2 / l_0)$; k_0, l_0 – масштабні коефіцієнти, що підбираються експериментально.

Задача емпіричного оцінювання коефіцієнтів a, b, k, k_0, l_0 в (1)-(3) є досить складною і трудомісткою. Для її розв'язання потрібно виконати експериментальні дослідження великого обсягу. Тому при дослідженні методів калібрування датчиків з використанням моделей виду (1)-(3) простіше отримати асимптотичні оцінки ефективності при обраних відповідним чином граничних значеннях даних коефіцієнтів.

На рис. 2 наведені приклади теоретичних моделей для гладкого дрейфу.

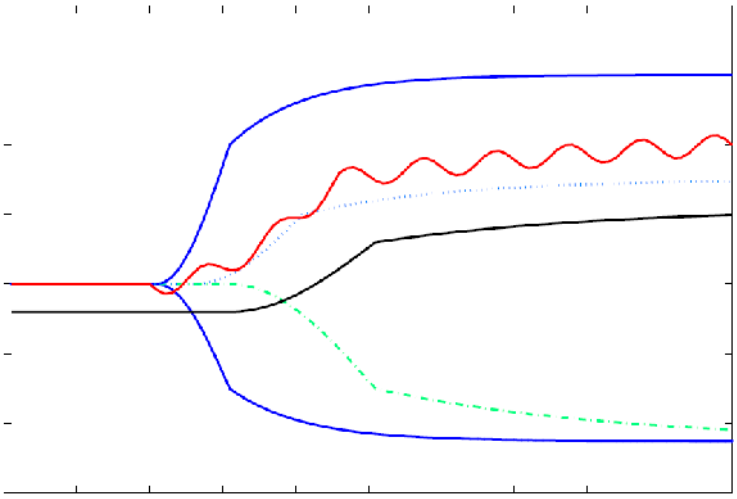


Рис. 2. Види моделей гладкого дрейфу параметрів

Розглянемо сегмент сенсорної мережі, який складається з M датчиків, розподілених за випадковим законом у певній області. Нехай $h_m(t)$, $m = \overline{1, M}$ є дійсним вихідним параметром.

Позначимо параметр, вимірюваний m-м датчиком у дискретний момент часу n в даній точці простору як g_{mn}. Після корекції дрейфу цей параметр змінюється. Позначимо скоректований параметр як $\hat{g}_{mn}$. Якщо всі датчики відкалібровані безпомилково, $g_{mn} = h_m(t_n) = h_{mn}$. У той же час дані, передані для подальшої обробки, будуть відповідати ліченим даним, тобто $\hat{g}_{mn} = g_{mn}$.

Для оцінювання скорегованої величини $\hat{g}_{mn}$ кожний датчик знаходить передбачене значення $\hat{f}_{mn}$ як функцію результатів скорегованих вимірів, зібраних сусідами на попередньому етапі, по співвідношенню

$$\hat{f}_{mn} = \psi\left(\hat{g}_{kn}\right), \; k = 1, M; \; k \neq m. \quad (4)$$

Потім передбачена величина комбінується з обмірюваною величиною g_{mn} й передбачуваним дрейфом d_{mn} для одержання скорегованого результату вимірів датчика $\hat{g}_{mn}$. На практиці кожний результат знімання даних, окрім дрейфу d_{mn}, містить шуми і завади. Дрейф на початковому етапі розміщення датчиків може бути нульовим або нехтовно малим залежно від виду датчика і навколишнього середовища розміщення мережі. Завдання полягає в розрахунках дрейфу для кожного датчика з використанням передбаченої величини $\hat{f}_{mn}$.

Значення $\hat{g}_{mn}$ можна розрахувати із застосуванням модельної функції допоміжного вектору регресії. У модельній функції враховуються часова і просторова кореляція результатів вимірів. Вектор регресії апроксимує $\hat{g}_{mn}$ з використанням попередніх скоректованих результатів усіх датчиків у сегменті, за винятком результату датчика, що розглядається.

Розглянемо метод корекції дрейфу в реальному масштабі часу для застосування в БСМ. Процедура корекції складається із двох етапів. На першому етапі для прогнозування результатів вимірів $\hat{g}_{mn}$ використовується навчальний вектор регресії, що містить у якості вихідних даних скореговані результати вимірів, отримані від сусідніх датчиків. На другому етапі застосовується фільтр Калмана для рекурсивної корекції дрейфу в лічених даних g_{mn} з використанням вихідних значень $\hat{f}_{mn}$ вектору регресії для визначення скорегованих результатів вимірів $\hat{g}_{mn}$.

Ціль використання допоміжного вектору регресії – передбачити фактичні виміри $\hat{f}_{mn}$ з використанням скорегованих результатів від сусідніх датчиків. У кожний датчик уводиться модельна функція $\varphi(\cdot)$, яка може використовуватися для передбачення наступних коректних (вільних від похибок) вимірів на інтервалі спостереження. Процедура передбачення складається із двох фаз: навчання й робочої фази. На фазі навчання результати вимірів, зібрані протягом початкового періоду розгортання (навчальний набір даних), використовуються для моделювання функції $\varphi(\cdot)$. У процесі робочої фази навчена модель $\varphi(\cdot)$ використовується для передбачення наступних результатів виміру $\hat{f}_{mn}$.

Передбачається, що дані навчання (зібрані протягом початкових періодів розгортання) вільні від будь-якого дрейфу і можуть використовуватися для навчання в кожному вузлу. Це припущення обґрунтоване тим, що датчики, як правило, калібруються перед розгортанням. Для оцінок використовується Гаусівське ядро допоміжного вектору регресії [13]. Однак набір навчальних даних, що тут використовується, трохи відрізняється тим, що охоплюються скоректовані результати вимірів сусідніх датчиків. Крім того, не беруться до уваги скоректовані результати безпосередньо m-го датчика. Набір навчальних даних в m-у датчику позначимо

$$G_{tr} = \{G_{n-1}, G_n\},$$

де $G_{n-1} = (g_{k,n-1}),\ k = 1,2,\ldots,m-1,m+1,\ldots,M$; $G_n = (g_{mn}),\ m = 1,2,\ldots,M$.

Модель, що отримана на основі допоміжного вектору регресії, використовується протягом робочої фази для передбачення наступних фактичних вимірів $\hat{f}_{mn}$. Для виміру дрейфу датчика обчислюється різниця між результатом виміру g_{mn} та модельним значенням компонента вектору регресії $\hat{f}_{mn}$, яке використовується в якості опорного. Ця різниця уводиться в одну з модифікацій фільтра Калмана, яку назвемо безпошуковим фільтром Калмана з випадковим пошуком (БПФК) [14], разом із g_{mn} для оцінювання скоректованих результатів $\hat{g}_{mn}$ і величини дрейфу d_{mn}. На рис. 3 зображена структурна схема системи корекції дрейфу в БСМ. На ній представлені етапи виявлення похибок і процедура корекції в m-у датчику мережного сегмента.

Результати моделювання. Моделювалася БСМ (рис. 4), що складається з 51 датчика, включаючи шлюз зовнішнього доступу. Датчики розташовувалися випадковим чином на сітці розсіювання по двовимірному нормальному закону на площадці прямокутної форми розмірами 100x200 м. Середня відстань між датчиками дорівнювала 20 м, середньоквадратичне відхилення 3 м по кожній координаті. Кожний датчик мав зв’язок із сімома найближчими сусідами.

Для оцінювання стану та параметрів системи генерувалися 2000 вибірок. Перші 1000 вибірок використовувалися на фазі навчання. При цьому уводився експонентний тренд виду (2). Наступні 1001…2000 вибірки використовувалися на робочій фазі для тестування алгоритму корекції дрейфу.

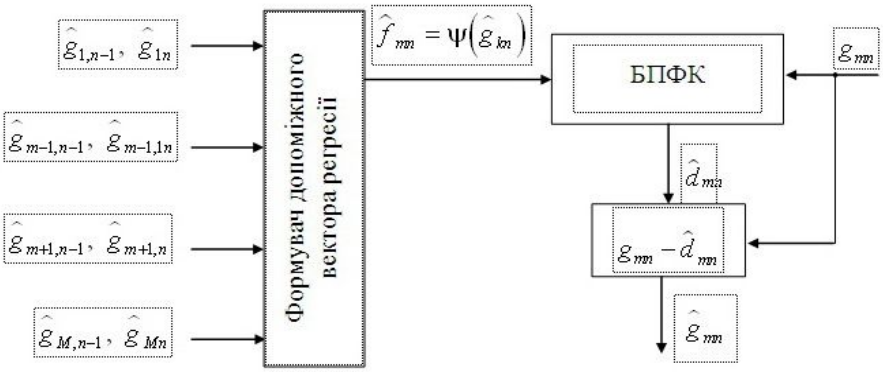


Рис. 3. Структурна схема системи корекції дрейфу. БПФК – безпошуковий фільтр Калмана

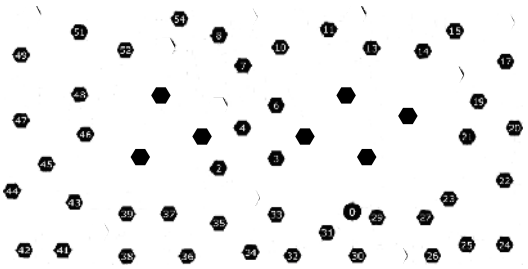


Рис. 4. Схема розміщення датчиків у модельованій БСМ

На рис. 5 показані графіки середнього модуля похибки обмірюваного параметра щодо дійсних значень для різної кількості датчиків із дрейфом параметрів. Для кожного датчика та кожного елемента вибірки даних розраховувалося абсолютне значення похибки обмірюваного параметра щодо дійсного значення, після чого модулі похибки осереднювались для усіх датчиків. Тут і далі задавався пороговий рівень, при перевищенні якого похибка вимірювання вважалася неприйнятною.

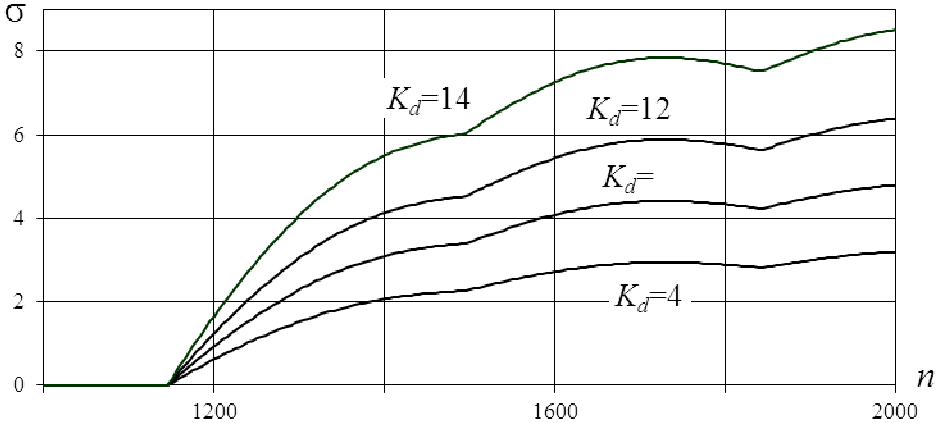


Рис. 5. Графіки зміни середнього модуля похибки для різної кількості датчиків K_d із дрейфом параметрів

Аналогічно розраховувалися значення середнього модуля похибки скоректованих результатів вимірювань щодо дійсних значень параметра (рис. 6) із застосуванням методу ФКСП. Видно, що при корекції дрейфу похибка для тієї самої кількості датчиків із дрейфом параметрів зростає повільніше. Отже, завдяки застосуванню алгоритму поточної корекції результатів збільшується період роботи БСМ із прийнятною точністю вимірювання.

Для порівняння на рис. 7 показані результати моделювання із застосуванням алгоритму корекції параметрів для вибірки у 4000 відліків. Стрибки на кривих обумовлені різкими змінами вимірюваних параметрів у певні моменти часу. Відзначимо, що при збільшенні обсягу вибірки збільшується інтервал спостереження, але має місце краще згладжування похибок. Отже, існує певний компроміс у виборі оптимальної довжини вибірки при вимірюваннях.

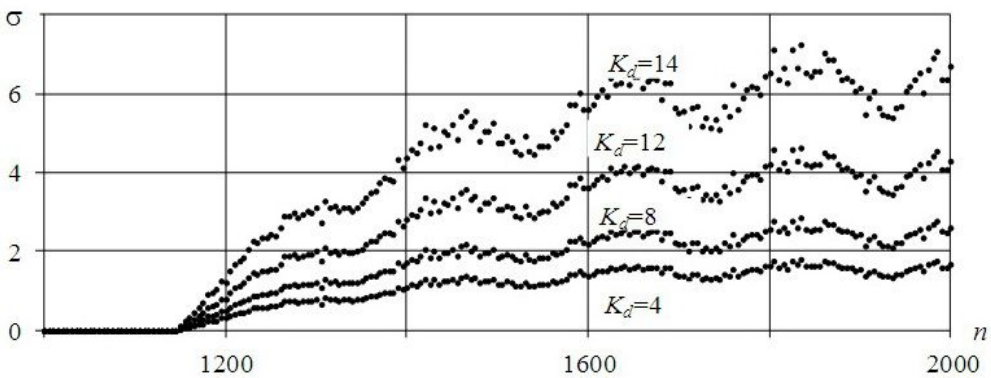


Рис. 6. Графіки зміни середнього модуля похибки для різної кількості датчиків K_d із дрейфом параметрів і скоректованих результатів вимірювань

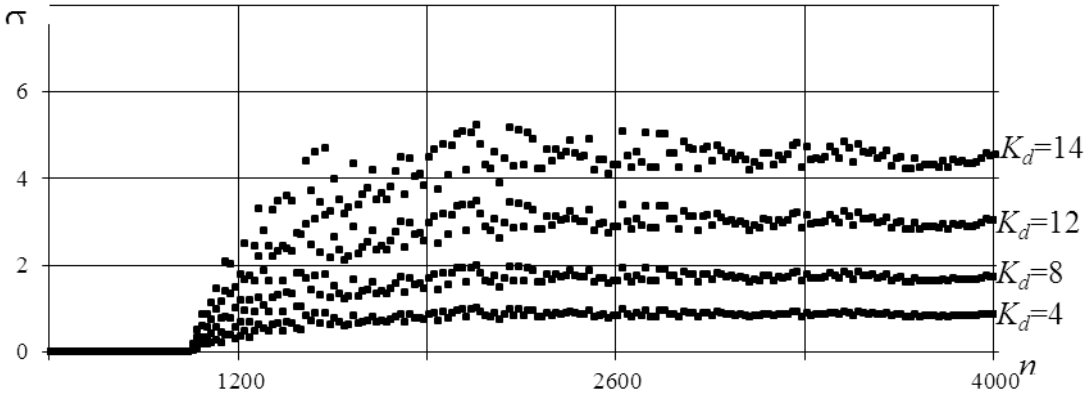


Рис. 7. Графіки зміни середнього модуля похибки для різної кількості датчиків K_d із дрейфом параметрів

Висновки

1. Запропонований метод виявлення похибок і корекції результатів вимірів датчиків у БСМ заснований на припущенні про просторово-часову кореляцію результатів вимірів у сусідніх датчиках і відсутності взаємної кореляції процесів дрейфу технічних параметрів.

2. Для моделювання просторово-часової кореляції використовувався допоміжний вектор регресії, по рівняннях якої обчислювався прогноз майбутніх результатів вимірювань.

3. Передбачені дані використовувались у БПФК для оцінювання дійсного значення вимірюваних величин. Алгоритм по суті є децентралізованим і працює рекурсивно протягом усього життєвого циклу БСМ. Отже, застосування алгоритмів даного типу не обмежують можливості розширюваності та масштабованості мереж.

Література

1. Виноградов Н. А. Повышение точности измерений в беспроводных сенсорных сетях путем коррекции дрейфа параметров датчиков / Н. А. Виноградов, А. С. Торошанко // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Том 10, № 4. – С. 14–20.

2. Hoadley B. A Bayesian look at inverse linear regression / B. Hoadley // Journalof the American Stats. Association. –1970. – No. 65(329). – P. 356–369.

3. Feng J. Model-based calibration for sensor networks / J. Feng, S. Megerian, M. Potkonjak // Sensors. – 2003. – P. 737–742.

4. Balzano L. Blind calibration of networks of sensors: Theory and algorithms / L. Balzano, R. Nowak // Networked Sensing Information and Control. – 2008. – Springer US. – P. 9–37.

5. Taylor C. Simultaneous localization, calibration, and tracking in an ad hoc sensor network / C. Taylor, A. Rahimi, J. Bachrach, H. Shrobe, A. Grue // Proceedings of 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN06). – 2006. – P. 27–33.

6. Krishnamachari B. Distributed Bayesian algorithms for fault-tolerant event region detection in wireless sensor networks / B. Krishnamachari, S. Iyengar // IEEE Trans. Computers. – 2004. – No. 53(3). – P. 241–250.

7. Sallans B. Statistical model-based sensor diagnostic for automation systems. / B. Sallans, D. Bruckner, G. Russ // Field bus systems and their applications, Elsevier. – 2005. – P. 239–246.

8. Rajasegarar S. Quarter sphere based distributed anomaly detection in wireless sensor networks / S. Rajasegarar, C. Leckie, M. Palaniswami, J. Bezdek // Proceedings of the IEEE International Conference Communications (IEEE ICC ’07), UK. – 2007. – P. 126–133.

9. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции / Г. Ван Трис. – Москва : Советское радио, 1972. – 744 с.

10. Nowak R. Boundary estimation in sensor networks: Theory and methods / R. Nowak, U. Mitra // In IPSN. – 2003. – P. 80–95.

11. Wang Y. M. Non- linear estimation and modelling of FMRI data using spatio-temporal support vector regression / Y. M. Wang, R. T. Schultz, R. T. Constable, L. H. Staib1 // Information Processing in Medical Imaging. – 2003. – No. 2732. – P. 647–659.

12. Балакришнан А. В. Теория фильтрации Калмана / А. В. Балакришнан. – Москва : Мир, 1988. – 168 с.

13. Takruri M. Spatio-temporal modelling-based drift-aware wireless sensor networks / M. Takruri, S. Rajasegarar, S. Challa, C. Leckie, M. Palaniswami // Wireless Sensor Systems, IET. – 2011. – Vol. 1, No. 2. – P. 110–122.

14. Растригин Л. А. Статистические методы поиска / Л. А. Растригин. – Москва : Наука, 1968. – 376 с.

References

1. Vinogradov N. A. Increase of exactness of measurings in wireless sensory networks by the correctionof drift of sensors parameters / N. A. Vinogradov, A. S. Toroshanko // Visnyk Derzhavnoho universytetu informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii. – 2012. – Vol. 10, no.4. – P. 14-20.

2. Hoadley B. A Bayesian look at inverse linear regression / B. Hoadley // Journalof the American Stats. Association. – 1970. – No. 65(329). – P. 356–369.

3. Feng J. Model-based calibration for sensor networks / J. Feng, S. Megerian, M. Potkonjak // Sensors. – 2003. – P. 737-742.

4. Balzano L. Blind calibration of networks of sensors: Theory and algorithms / L. Balzano, R. Nowak // Networked Sensing Information and Control. – 2008. – Springer US. – P. 9-37.

5. Taylor C. Simultaneous localization, calibration, and tracking in an ad hoc sensor network / C. Taylor, A. Rahimi, J. Bachrach, H. Shrobe, A. Grue // Proceedings of 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN06). – 2006. – P. 27-33.

6. Krishnamachari B. Distributed Bayesian algorithms for fault-tolerant event region detection in wireless sensor networks / B. Krishnamachari, S. Iyengar // IEEE Trans. Computers. – 2004. – No. 53(3). – P. 241-250.

7. Sallans B. Statistical model-based sensor diagnostic for automation systems. / B. Sallans, D. Bruckner, G. Russ // Field bus systems and their applications, Elsevier, –2005. – P. 239-246.

8. Rajasegarar S. Quarter sphere based distributed anomaly detection in wireless sensor networks / S. Rajasegarar, C. Leckie, M. Palaniswami, J. Bezdek // Proceedings of the IEEE International Conference Communications (IEEE ICC ’07), UK. – 2007. – P. 126-133.

9. Van Tris G. Theory of pickin-up, estimations and modulation. Vol.1. Theory of pickin-up, estimations and linear modulation / G. Van Tris. – Moskva: Sovetskoe radio, 1972. – 744 p.

10. Nowak R. Boundary estimation in sensor networks: Theory and methods / R. Nowak, U. Mitra // In IPSN. – 2003. – P. 80-95.

11. Wang Y. M. Non- linear estimation and modelling of FMRI data using spatio-temporal support vector regression / Y. M. Wang, R. T. Schultz, R. T. Constable, L. H. Staib1 // Information Processing in Medical Imaging. – 2003. – No. 2732. – P. 647-659.

12. Balakrishnan A. V. Theory of Kalman filtration / A. V. Balakrishnan. – Moskva: Mir, 1988. – 168 p.

13. Takruri M. Spatio-temporal modelling-based drift-aware wireless sensor networks / M. Takruri, S. Rajasegarar, S. Challa, C. Leckie, M. Palaniswami // Wireless Sensor Systems, IET. – 2011. – Vol. 1, No. 2. – P. 110-122.

14. Rastrigin L. A. Statisticalmethods of search / L. A. Rastrigin. – Moskva: Nauka, 1968. – 376 p.

Рецензія/Peer review : 21.09.2017 р. Надрукована/Printed :31.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н. Бойко Ю. М.

УДК 621.317.73

В.В. МАРТИНЮК, Д.А. МАКАРИШКІН, Н.М. САМАРУК, Л.В. КАРПОВА
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОРІДНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ НА ОСНОВІ ТЕОРЕМИ МІТТАГ-ЛЕФФЛЕРА

В статті наведено моделювання однорідної лінії передачі на основі теореми Міттаг-Леффлера у режимі холостого ходу, режимі короткого замикання та навантажувальному режимі. Встановлено, що реалізація функцій вхідного комплексного опору та вхідної комплексної провідності однорідної лінії передачі на основі теореми Міттаг-Леффлера базується на їх представленні у вигляді суми простих дробів. Побудовані модифіковані еквівалентні схеми заміщення однорідної лінії передачі, які синтезовані за першою та другою формами Фостера. Розроблені вдосконалені еквівалентні схеми заміщення для моделювання однорідної лінії передачі. Отримані аналітичні вирази для визначення електричних параметрів елементів вдосконалених еквівалентних схем заміщення однорідної лінії передачі.

Ключові слова: моделювання, математична модель, однорідна лінія передачі, еквівалентна схема заміщення, вхідний комплексний опір, вхідна комплексна провідність, теорема Міттаг-Леффлера.

V.V. MARTYNYK, D.A. MAKARYSHKIN, N.M. SAMARUK, L.V. KARPOVA
Khmelnytsky National University

MODELLING OF THE HOMOGENEOUS TRANSMISSION LINE ON THE BASIS OF THE MITTAG-LEFFLER THEOREM

The paper presents the modelling of the homogeneous transmission line on the basis of the Mittag-leffler theorem in the mode of idling, in the mode of short circuit and loading mode. It was established that the implementation complex impedance input function and complex admittance input function of the homogeneous transmission line on the basis of the Mittag-leffler theorem are based on them as a sum of simple fractions. Developed modified equivalent circuits of the homogeneous transmission line that synthesized by the first and second form Foster. The improved equivalent circuits of the homogeneous transmission line for modelling are developed. The obtained analytical expressions for the determination of electrical parameters of the elements of the improved equivalent circuits of the homogeneous transmission line.

Keywords: modelling, mathematical model, homogeneous transmission line, equivalent circuit, input complex impedance, input complex admittance, Mittag-leffler theorem.

Постановка проблеми. Задача поширення сигналу вздовж ліній передач відіграє центральну роль у сучасних технологіях обробки та передачі сигналів. Швидкісні аналогові та цифрові кола будь-якого рівня інтеграції пропонують широкий вибір прикладів ліній зв'язку, які приєднані до пристроїв з різними вхідними характеристиками. Одною із головних причин появи проблеми обмеження зверху робочої довжини будь-якої лінії передачі є наявність втрат у лінії. Тому компенсація втрат енергії сигналу сприяє вирішенню цієї проблеми та дає можливість покращити амплітудно-частотні характеристики пасивних фільтрів нижніх частот з використанням ліній передач. Необхідні показники роботи лінії передачі можна гарантувати лише на основі розрахунку якомога точніших їх математичних моделей. Для створення математичних моделей лінії передачі, традиційно використовуються, підходи з еквівалентуванням розподілених параметрів цієї лінії у вигляді заступних схем із зосередженими параметрами [1, 2].

Математичне моделювання ліній зв'язку на сьогоднішній день є важливою технічною проблемою. За допомогою математичного апарату математичного моделювання можна аналізувати електромагнітні неусталені процеси різноманітних радіоелектронних об'єктів та систем, не залучаючи до останніх коштовні натурні експерименти. Одною із найважливіших задач радіоелектронного обладнання є моделювання різних процесів в лініях передачі, які можна розглядати, як довгі лінії з розподіленими параметрами, оскільки самі лінії вносять суттєвий вклад у динамічні властивості системи [1, 2]. Довгі лінії призначені для передачі електромагнітної енергії та мають довжину, яка перевищує довжину хвилі електромагнітних коливань. До них відносяться двопровідні повітряні лінії зв'язку, симетричні та коаксіальні кабельні лінії провідних систем зв'язку, фідери, які зв'язують радіопередавачі з антенами і т.д. Нормальні та перехідні режими лінії передачі характеризуються особливостями, які обумовлені хвильовим характером розподілу електромагнітної енергії та співвідношеннями питомих параметрів лінії. Одним із засобів, що спрощує представлення про процеси, які протікають у лініях зв'язку, є еквівалентні схеми заміщення ліній передачі, за допомогою яких можуть бути проведені дослідження лінії передачі в усталеному та квазіусталеному режимах. Еквівалентні схеми заміщення однорідних ліній передач можуть відображати параметри системи та параметри режиму тільки у визначений момент часу. Однак, в залежності від необхідної точності ці моделі можуть бути представленими у вигляді різних електричних схем, які значно спрощують задачу, але вносять похибку у динамічну модель системи. Таке спрощення схем інколи може призводити до невірних виводів про стійкість системи.

Тому моделювання однорідної лінії передачі є актуальною науковою задачею і має важливе значення для підвищення ефективності проектування та покращення характеристик цього класу пристроїв.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Однорідну лінію передачі можна представити у вигляді

множини послідовно з'єднаних нескінчених елементів довжиною dx, кожен з яких має активний опір R_0dx та індуктивність L_0dx, активну провідність G_0dx та ємність C_0dx (рис. 1) [1–3].

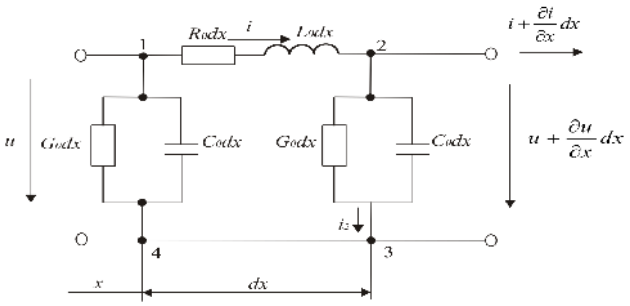


Рис. 1. Схема заміщення регулярної лінії передачі довжиною *dx*

На рис. 1 використані наступні позначення: dx – довжина ділянки однорідної лінії; R_0 – опір одиниці довжини лінії; L_0 – індуктивність одиниці довжини лінії; C_0 – ємність одиниці довжини лінії; G_0 – провідність одиниці довжини лінії. Опір R_0dx та індуктивність L_0dx будемо рахувати включеними в один провід.

Позначимо через x відстань від початку лінії до поточного елементу її довжини. Для елемента лінії довжиною dx складаємо рівняння за першим законом Кіргофа для вузла 2 і за другим законом Кіргофа для контуру 12341 (рис. 1).

Отримаємо рівняння регулярної лінії, які в літературі часто називають телеграфними [1–3]

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \dfrac{\partial i}{\partial t}, \\ -\dfrac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \dfrac{\partial u}{\partial t}. \end{cases} \tag{1}$$

Розв'язок отриманої системи рівнянь в часткових похідних при визначених початкових та граничних умовах дає можливість визначити струм і напругу як функцію двох незалежних змінних: просторової координати x, яка визначає відстань від початку лінії, і часу t. Ці рівняння є справедливими при будь-якій зміні струму та напруги у часі.

При встановлених режимах струми і напруги змінюється у часі по періодичному закону. Представив періодичні функції часу у вигляді ряду Фур'є, можна провести розрахунок окремо для кожної синусоїдальної складової цього ряду і внаслідок лінійності кола отримати результуючий процес, користуючись методом накладання. Тому достатньо провести аналіз процесів в лінії при синусоїдальних струмах та напругах.

Нехай струм і напруга в лінії змінюються у часі за синусоїдальним законом з кутовою швидкістю ω. Користуючись комплексним методом, представимо рівняння лінії для комплексних діючих напруг $\dot{U}$ та $\dot{I}$ [1–3]:

$$\begin{cases} -\dfrac{d\dot{U}}{dx} = (R_0 + j\omega L_0)\dot{I}, \\ -\dfrac{d\dot{I}}{dx} = (G_0 + j\omega C_0)\dot{U}. \end{cases} \tag{2}$$

В подальшому будемо позначати струм та напругу на початку лінії (x=0) індексом 1 ($\dot{I}_1, \dot{U}_1$) та в кінці лінії ($x=l$, l – довжина лінії) – індексом 2 ($\dot{I}_2, \dot{U}_2$).

Розв'язуючи систему рівнянь (2), напругу $\dot{U}_1$ й струм $\dot{I}_1$ на вході лінії можна виразити через напругу $\dot{U}_2$ й струм $\dot{I}_2$ на виході лінії співвідношенням:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 ch\gamma l + \dot{I}_2 Z sh\gamma l, \\ \dot{I}_1 = \dfrac{\dot{U}_2}{Z} sh\gamma l + \dot{I}_2 ch\gamma l. \end{cases} \tag{3}$$

де $\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(g + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$ – коефіцієнт розповсюдження лінії, α – коефіцієнт затухання, β – коефіцієнт фази; $Z = \sqrt{\dfrac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$ – хвильовий або характеристичний опір лінії.

Порівнюючи рівняння однорідної довгої лінії (3) з рівняннями чотириполюсника в А-параметрах (4) [1, 4, 5]

$$\begin{cases} U_1 = AU_2 + BI_2, \\ I_1 = CU_2 + DI_2. \end{cases} \quad (4)$$

можна зробити висновок, що однорідна довга лінія – це симетричний чотириполюсник, коефіцієнти якого

$$A = D = ch\gamma l, \quad (5)$$

$$B = Zsh\gamma l, \quad (6)$$

$$C = \frac{sh\gamma l}{Z}. \quad (7)$$

Для симетричного пасивного чотириполюсника рівняння зв'язку коефіцієнтів системи рівнянь в А-формі

$$AD - BC = ch^2\gamma l - sh^2\gamma l = 1. \quad (8)$$

Як і будь-який чотириполюсник, однорідна лінії передачі може бути замінена Т- або П-подібною, в даному випадку еквівалентною схемою. Параметри еквівалентних схем обчислюються через постійні *A*, *B*, *C* та *D* [1–6].

Дослідження процесів в однорідній лінії передачі здійснюють на моделях із зосередженими параметрами. Можливість переходу до такої моделі при фіксованих параметрах R_0, L_0, G_0, C_0 та довжини *l* визначаються тим, що рівняння, які зв'язують вхідні і вихідні струми та напруги лінії, представляють собою рівняння симетричного чотириполюсника (3), тому при моделюванні процесів на вході і виході однорідної лінії передачі користуються однією зі схем заміщення чотириполюсника – Т-подібна (рис. 2) або П-подібна (рис. 3), використовуючи співвідношення, які зв'язують параметри цих схем з параметрами чотириполюсника [1–6].

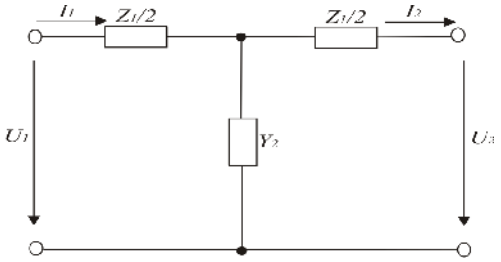


Рис. 2. Т-подібна схема заміщення

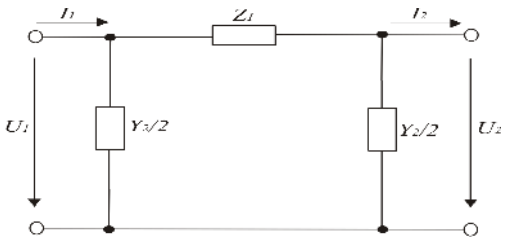


Рис. 3. П-подібна схема заміщення

Як випливає із формул (3) та (4) для Т-подібної схеми заміщення (рис. 2) [1–6]

$$\begin{cases} A = D = \dfrac{U_{10}}{U_{20}} = ch\gamma l = 1 + \dfrac{Z_1 Y_2}{2}, \\ C = \dfrac{I_{10}}{U_{20}} = \dfrac{sh\gamma l}{Z} = Y_2. \end{cases} \quad (9)$$

де комплексні струми та напруги відповідають режиму холостого ходу на вторинних полюсах схеми заміщення.

Тоді

$$\begin{cases} Z_1 = Z_0 l K_1, \\ Y_2 = Y_0 l K_2. \end{cases} \quad (10)$$

де $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$, $Y_0 = G_0 + j\omega C_0$ – погонні параметри однорідної лінії передачі;

$K_1 = \dfrac{2(ch\gamma l - 1)}{\gamma l sh\gamma l}$, $K_2 = \dfrac{sh\gamma l}{\gamma l}$ – коефіцієнти пропорційності.

Для П-подібної схеми заміщення (рис. 3) [1–6]

$$\begin{cases} A = D = \dfrac{U_{10}}{U_{20}} = 1 + \dfrac{Z_1 Y_2}{2}, \\ B = Z_1. \end{cases} \quad (11)$$

Тоді

$$\begin{cases} Z_1 = Z_0 l K_2, \\ Y_2 = Y_0 l K_1. \end{cases} \quad (12)$$

Однак, недоліком таких схем заміщення, є те, що в загальному випадку параметри однорідної лінії передачі *Z* та *γ* є складними функціями частоти *ω*, тому використання введених схем для моделювання однорідної лінії передачі є обмеженим, оскільки при переході на іншу частоту параметри схем заміщення змінюються. Також виникають труднощі у розрахунках коефіцієнтів K_1 та K_2, оскільки необхідно визначати

значення гіперболічних функцій від комплексного аргументу γ, при цьому коефіцієнти K_1 та K_2 представляють рядами (13)

$$K_1 = \frac{2(ch\gamma l - 1)}{\gamma l sh\gamma l} \approx 1 - \frac{(\gamma l)^2}{12} + \frac{(\gamma l)^4}{120} - .....$$
$$K_2 = \frac{sh\gamma l}{\gamma l} \approx 1 + \frac{(\gamma l)^2}{6} + \frac{(\gamma l)^4}{120} + ... \quad (13)$$

Це обмежує використання формул (9) та (11) граничною довжиною $l_{гр}$, для якої K_1=1 та K_2=1, визначається за умови

$$l_{гр} = \frac{\sqrt{0,06}}{\gamma}. \quad (14)$$

Для моделювання процесів в реальних однорідних лініях передачі збирають еквівалентні схеми, які представляють собою каскадне включення декількох симетричних однакових чотириполюсників, тому для відтворення параметрів однорідної лінії передачі в більш широкому частотному діапазоні використовують однорідну ланкову схему (рис. 4), яка складається з n однакових каскадних включених Т- або П-подібних схем, кожна з яких відповідає відрізку лінії довжиною $Dl=l/n$ [1–6].

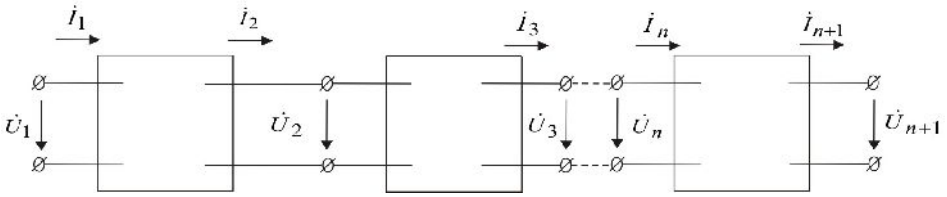


Рис. 4. Однорідна симетрична ланцюгова схема довгої лінії

Дослідження різних режимів роботи однорідної лінії є одною з найважливіших задач у теорії електричних кіл, моделювання якої зручно розглядати у вигляді електричних кіл з розподіленими параметрами [2, 7]. Модель такої однорідної лінії складається з n Т-подібних ланок та представляє собою багатоланковий фільтр нижніх частот з втратами в елементах фільтра (рис. 5) [2, 7].

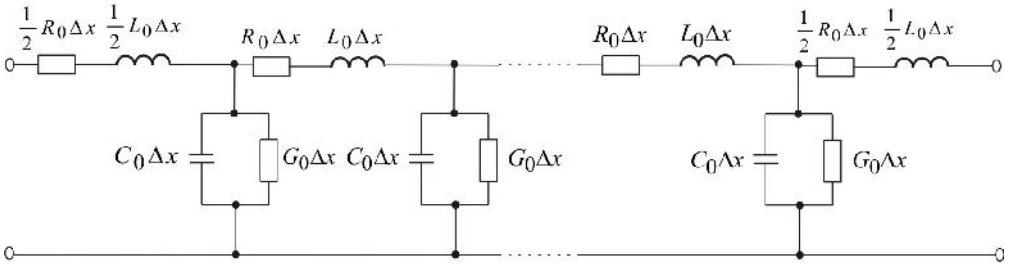


Рис. 5. Модель однорідної лінії у вигляді багатоланкового фільтра нижніх частот

Чим більшою є величина n (тобто меншою є величина Δx), тим точніше модель лінії описує електромагнітний стан однорідної лінії. Для однорідних ліній без спотворень, тобто ліній, для яких є справедливим наступне співвідношення між її первинними параметрами [2, 7]:

$$\frac{R_0}{L_0} = \frac{G_0}{C_0}, \quad (15)$$

хвильовий опір визначається виразом (16)

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (16)$$

Модель однорідної лінії без втрат (R_0=0 та G_0=0), яка навантажена на опір $R_н$=Z, представлена на рис. 6.

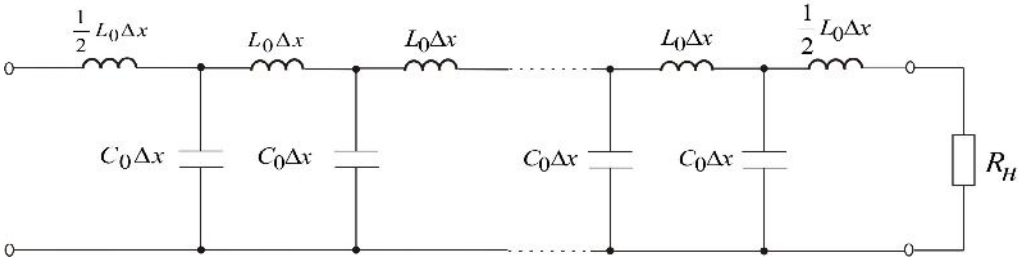


Рис. 6. Модель однорідної лінії без втрат

Параметри кожної Т- або П-подібної схеми визначають із вище наведених формул (9) та (11) для відповідних схем при заміні в них l на Dl. При достатньо великій кількості схем добуток γDl в аргументах гіперболічних функцій є малим. Це дозволяє використовувати наближені вирази $shx \approx x$, $thx \approx x$ та $cthx \approx 1/x$, а також перейти до формул (17) і (18) для Т-подібних схем та формул (19) і (20) для П-подібних схем.

$$Z_1 = \frac{2(ch\gamma Dl - 1)}{sh\gamma Dl} Z = 2Zth\frac{\gamma Dl}{2} \approx 2Z\frac{\gamma Dl}{2} = Z\gamma Dl = \frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}}\sqrt{R_0 + j\omega L_0}\sqrt{G_0 + j\omega C_0}Dl = (R_0 + j\omega L_0)Dl, \quad (17)$$

$$Y_2 = \frac{sh\gamma Dl}{Z} \approx \frac{\gamma Dl}{Z} = \frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}\sqrt{G_0 + j\omega C_0}Dl}{\frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}}} = (G_0 + j\omega C_0)Dl, \quad (18)$$

$$Z_1 = Zsh\gamma Dl \approx Z\gamma Dl = \frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}}\sqrt{R_0 + j\omega L_0}\sqrt{G_0 + j\omega C_0}Dl = (R_0 + j\omega L_0)Dl, \quad (19)$$

$$Y_2 = \frac{2(ch\gamma Dl - 1)}{Zsh\gamma Dl} = \frac{2}{Z}th\frac{\gamma Dl}{2} \approx \frac{2}{Z}\frac{\gamma Dl}{2} = \frac{1}{\frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}}}\sqrt{R_0 + j\omega L_0}\sqrt{G_0 + j\omega C_0}Dl = (G_0 + j\omega L_0)Dl. \quad (20)$$

Такий результат відповідає безпосередньо заміні відрізку однорідної лінії передачі довжиною Dl еквівалентними його елементами з зосередженими параметрами – поздовжніми опором RDl та індуктивністю LDl, поперечною провідністю GDl та ємністю CDl. Для з'ясування частотного діапазону, в якому така ланкова модель адекватно відображає властивості лінії передачі в цілому, необхідно за допомогою формул для A-параметрів симетричної ланкової схеми зіставити їх частотні характеристики з частотними залежностями відповідних параметрів лінії передачі.

Точність моделювання процесів в однорідній лінії передачі використовуючи такий підхід, буде тим більша, чім більша кількість каскадів, які входять у схему. Вибір кількості каскадів в моделі однорідної лінії передачі залежить від тих задач, які ставляться при дослідженнях. Для великої кількості задач буває достатньо взяти 10–20 каскадів [4–6].

Однак, недоліком використання ланкової моделі є обмежений частотний діапазон, оскільки таку модель допустимо використовувати тільки, в тому діапазоні частот де різниця її частотних характеристик та частотних залежностей параметрів однорідної лінії передачі не перевищує заданої похибки.

Як показано в [5] в інтервалі частот $0 \le \omega \le \omega_з$ ($\omega_з$ – частота зрізу) ланкова схема володіє основною властивістю розподіленої лінії: напруга в її вузлах є однаковою за амплітудою, але різна за фазовим зсувом. При цьому загальний фазовий зсув змінюється лінійно вздовж системи.

Фазовий зсув є еквівалентним коефіцієнту фази β, а також залежить від частоти нелінійно і тому, ланковий еквівалент на відміну від ідеально розподіленої лінії володіє частотною дисперсією. Це призводить до суттєвого спотворення затриманих імпульсів, якщо ширина їх спектру є співрозмірною з частотою зрізу $\omega_з$ [5].

В області $\omega > \omega_з$ ланковий еквівалент поводить себе подібно фільтру нижніх частот. При цьому спостерігається експоненціальне зменшення амплітуди сигналу від каскаду до каскаду, яке пов'язано не з ефектом омічних втрат, а виникненням розузгодження окремих елементарних каскадів пасивного чотириполюсника [5].

Метою статті є розробка математичної моделі однорідної лінії передачі на основі теореми Міттаг-Леффлера.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для підвищення точності математичного опису параметрів і характеристик однорідної лінії передачі автори пропонують використовувати два методи, які засновані на теоремі Міттаг-Леффлера [8, 9], яка представлена у вигляді співвідношень (21) для гіперболічного тангенсу (перший метод) та (22) для гіперболічного котангенсу (другий метод):

$$thx = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2x}{x^2 + (n\pi - \frac{\pi}{2})^2} \quad (21)$$

$$cthx = \frac{1}{x} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2x}{x^2 + (n\pi)^2} \quad (22)$$

Розглянемо більш детально режими роботи однорідної довгої лінії: режим холостого ходу, режим короткого замикання та навантажувальний режим.

Режим холостого ходу. При холостому ході в кінці однорідної довгої лінії опір навантаження

дорівнює нескінченості $Z_н=\infty$, тобто струм в навантажені буде дорівнювати нулю, а напруга збільшується вдвічі. Формула для вхідного комплексного опору однорідної довгої лінії в режимі холостого ходу можна записати у вигляді (23) [1–6].

$$Z_{вх.хх}(j\omega) = Zcth\gamma x' \tag{23}$$

де $x' = l - x$ – відстань від кінця однорідної лінії передачі.

Зробимо заміну Z та γ їх виразами. В результаті отримаємо вираз (24), який відповідає еквівалентній схемі заміщення однорідної лінії передачі .

$$Z_{вх.хх}(j\omega) = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}} cth\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right) = \frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}} cth\left(\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}\, x'\right). \tag{24}$$

У виразі вхідного комплексного опору (24) гіперболічний котангенс виразимо через теорему Міттаг-Леффлера за формулою (22) (другий метод), тоді вхідний комплексний опір однорідної довгої лінії запишемо у наступному вигляді

$$Z_{вх.хх}(j\omega) = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}}\left(\frac{1}{\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'}{\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right)^2 + (n\pi)^2}\right) = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{Z_0}\, 2\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'}{\sqrt{Y_0}\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right)^2 + (n\pi)^2} =$$

$$= \frac{1}{Y_0 x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Z_0 x'}{Z_0 Y_0 (x')^2 + (n\pi)^2} = \frac{1}{Y_0 x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0 Y_0 (x')^2 + (n\pi)^2}{2Z_0 x'}} = \frac{1}{Y_0 x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0 Y_0 (x')^2}{2Z_0 x'} + \dfrac{(n\pi)^2}{2Z_0 x'}} = \frac{1}{Y_0 x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Y_0 x'}{2} + \dfrac{(n\pi)^2}{2Z_0 x'}}, \tag{25}$$

Враховуючі у виразі (25) тільки перші $2N$ полюсів вхідний комплексний опір однорідної довгої лінії у режимі холостого ходу матиме вигляд (26)

$$Z_{вх.хх}(j\omega) = \frac{1}{Y_0 x'} + \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{\dfrac{Y_0 x'}{2} + \dfrac{(n\pi)^2}{2Z_0 x'}} = \frac{1}{Y_0 x'} + \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{Y_n + \dfrac{1}{Z_n}} = \frac{1}{Y_0 x'} + \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{Y_n + Y_n'} = \frac{1}{Y_0 x'} + \frac{1}{Y_1 + Y_1'} + \frac{1}{Y_2 + Y_2'} + \ldots + \frac{1}{Y_N + Y_N'}, \tag{26}$$

де

$$Y_n = \frac{Y_0 x'}{2}, \tag{27}$$

$$Z_n = \frac{2Z_0 x'}{(n\pi)^2} \quad \text{при } n \ge 1, \tag{28}$$

$$Y_n' = \frac{(n\pi)^2}{2Z_0 x'} \quad \text{при } n \ge 1. \tag{29}$$

Використовуючи вираз вхідного комплексного опору (26) у вигляді суми дробів побудуємо модифіковану еквівалентну схему заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована по першій формі Фостера у режимі холостого ходу (рис. 7).

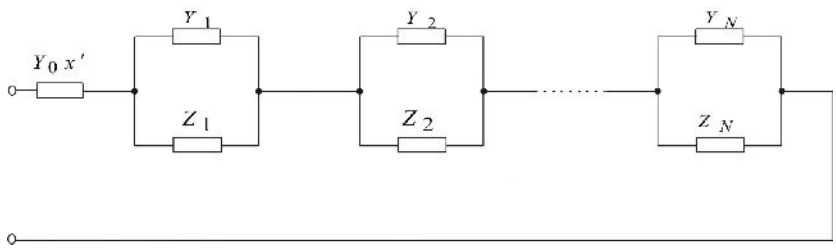


Рис. 7. Модифікована еквівалентна схема заміщення однорідної лінії передачі у вигляді суми дробів, яка синтезована за першою формою Фостера у режимі холостого ходу

Елементи модифікованої еквівалентної схеми заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована по першій формі Фостера у режимі холостого ходу можна визначити через її параметри Z_0 та Y_0 за формулами (27)–(29).

З урахуванням, того що $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$ та $Y_0 = G_0 + j\omega C_0$ вирази (27)–(29) можна представити у вигляді формул (30)–(32):

$$Y_n = \frac{Y_0 x'}{2} = \frac{G_0 x' + j\omega C_0 x'}{2} = \frac{G_0 x'}{2} + j\omega \frac{C_0 x'}{2}, \tag{30}$$

$$Z_n = \frac{2Z_0 x'}{(n\pi)^2} = \frac{2}{(n\pi)^2}\left(R_0 x' + j\omega L_0 x'\right) = \frac{2R_0 x'}{(n\pi)^2} + j\omega \frac{2L_0 x'}{(n\pi)^2} \quad \text{при } n \ge 1, \tag{31}$$

$$Y_n' = \frac{(n\pi)^2}{2Z_0x'} = \frac{(n\pi)^2}{(2R_0x' + j\omega 2L_0x')} = \frac{1}{\dfrac{2R_0x' + j\omega 2L_0x'}{(n\pi)^2}} = \frac{1}{\dfrac{2R_0x'}{(n\pi)^2} + j\omega\dfrac{2L_0x'}{(n\pi)^2}} \text{ при } n \geq 1. \quad (32)$$

Звідки можна визначити електричні параметри елементів запропонованої еквівалентної схеми заміщення однорідної довгої лінії, яка синтезована по першій формі Фостера у режимі холостого ходу через її первині параметри R_0, L_0, C_0 та G_0.

$$R_n = \frac{2R_0x'}{(n\pi)^2} \text{ при } n \geq 1, \quad (33)$$

$$L_n = \frac{2L_0x'}{(n\pi)^2} \text{ при } n \geq 1, \quad (34)$$

$$G_n = \frac{G_0x'}{2}, \quad (35)$$

$$C_n = \frac{C_0x'}{2}. \quad (36)$$

Такий результат відповідає безпосередньо заміні відрізку лінії передачі довжиною x' еквівалентними його елементами з зосередженими параметрами. З урахуванням співвідношень (33)–(36) побудуємо вдосконалену еквівалентну схему для моделювання однорідної лінії передачі у режимі холостого ходу, яка синтезована по першій формі Фостера (рис. 8).

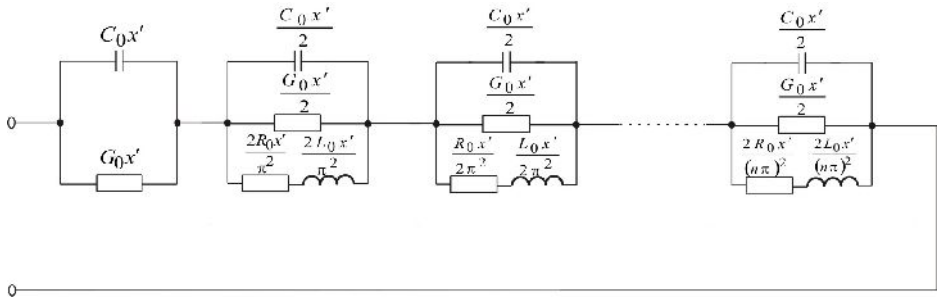


Рис. 8. Вдосконалена еквівалентна схема заміщення для моделювання однорідної лінії передачі у режимі холостого ходу, яка синтезована за першою формою Фостера

Формулу для вхідної комплексної провідності однорідної довгої лінії в режимі холостого ходу можна виразити через її комплексний вхідний опір (23), тоді

$$Y_{вх.хх}(j\omega) = \frac{1}{Z_{вх.хх}(j\omega)} = \frac{1}{\dfrac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}}\, cth\left(\sqrt{Z_0Y_0}\,x'\right)} = \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot \frac{1}{cth\left(\sqrt{Z_0Y_0}\,x'\right)} = \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot th\left(\sqrt{Z_0Y_0}\,x'\right). \quad (37)$$

Застосуємо теорему Міттаг-Леффлера за формулою (21) (перший метод) для виразу вхідної комплексної провідності однорідної довгої лінії в режимі холостого ходу (37), і отримаємо наступне співвідношення

$$Y_{вх.хх}(j\omega) = \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{Z_0Y_0}\,x'}{\left(\sqrt{Z_0Y_0}\,x'\right)^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot \frac{2\sqrt{Z_0}\sqrt{Y_0}\,x'}{Z_0Y_0x'^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Y_0x'}{Z_0Y_0x'^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} = \quad (38)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0Y_0x'^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2}{2Y_0x'}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0Y_0x'^2}{2Y_0x'} + \dfrac{\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2}{2Y_0x'}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0x'}{2} + \dfrac{\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2}{2Y_0x'}}.$$

Враховуючі у виразі (38) тільки перших $2N$ нулів вхідного комплексного опору однорідної довгої лінії у режимі холостого ходу, формула вхідної комплексної провідності матиме вигляд (39)

$$Y_{вх.хх}(j\omega)=\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{\frac{Z_0x'}{2}+\frac{\left(n\pi-\frac{\pi}{2}\right)^2}{2Y_0x'}}=\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{Z_n+\frac{1}{Y_n}}=\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{Z_n+Z'_n}=\frac{1}{Z_1+Z'_1}+\frac{1}{Z_2+Z'_2}+...+\frac{1}{Z_N+Z'_N}, \quad (39)$$

де

$$Z_n=\frac{Z_0x'}{2}, \quad (40)$$

$$Y_n=\frac{2Y_0x'}{\left(n\pi-\frac{\pi}{2}\right)^2}=\frac{8Y_0x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при } n\geq 1, \quad (41)$$

$$Z'_n=\frac{\left(n\pi-\frac{\pi}{2}\right)^2}{2Y_0x'}=\frac{((2n-1)\pi)^2}{8Y_0x'} \quad \text{при } n\geq 1. \quad (42)$$

Використовуючи вираз вхідної комплексної провідності (39) у вигляді суми дробів побудуємо модифіковану еквівалентну схему заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована за другою формою Фостера у режимі холостого ходу (рис. 9).

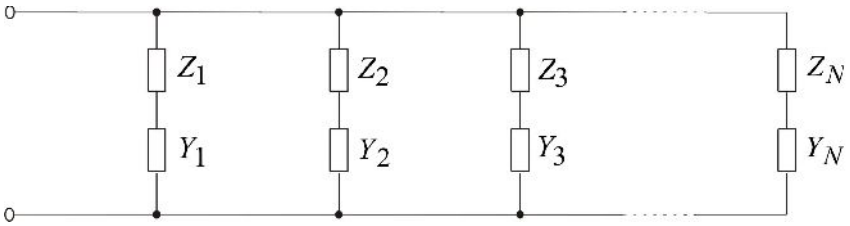


Рис. 9. Модифікована еквівалентна схема заміщення однорідної лінії передачі у вигляді суми дробів, яка синтезована за другою формою Фостера у режимі холостого ходу

Елементи модифікованої еквівалентної схеми заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована по другій формі Фостера у режимі холостого ходу можна визначити через її параметри Z_0 та Y_0 за формулами (40)–(42).

Враховуючі, що $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$ та $Y_0 = G_0 + j\omega C_0$, вирази (40)–(42) можна представити у вигляді формул (43)–(45):

$$Z_n=\frac{Z_0x'}{2}=\frac{R_0x'+j\omega L_0x'}{2}=\frac{R_0x'}{2}+j\omega\frac{L_0x'}{2}, \quad (43)$$

$$Y_n=\frac{8Y_0x'}{((2n-1)\pi)^2}=\frac{8}{((2n-1)\pi)^2}(G_0x'+j\omega C_0x')=\frac{8G_0x'}{((2n-1)\pi)^2}+j\omega\frac{8C_0x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при } n\geq 1, \quad (44)$$

$$Z'_n=\frac{((2n-1)\pi)^2}{8Y_0x'}=\frac{((2n-1)\pi)^2}{(8G_0x'+j\omega 8C_0x')}=\frac{1}{\frac{8G_0x'+j\omega 8C_0x'}{((2n-1)\pi)^2}}=\frac{1}{\frac{8G_0x'}{((2n-1)\pi)^2}+j\omega\frac{8C_0x'}{((2n-1)\pi)^2}} \quad \text{при } n\geq 1. \quad (45)$$

Звідки можна визначити електричні параметри елементів запропонованої еквівалентної схеми заміщення однорідної довгої лінії, яка синтезована за другою формою Фостера у режимі холостого ходу через її первині параметри R_0, L_0, C_0 та G_0.

$$R_n=\frac{R_0x'}{2}, \quad (46)$$

$$L_n=\frac{L_0x'}{2}, \quad (47)$$

$$G_n=\frac{8G_0x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при} \quad n\geq 1, \quad (48)$$

$$C_n=\frac{8C_0x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при} \quad n\geq 1. \quad (49)$$

З урахуванням співвідношень (46)–(49) побудуємо вдосконалену еквівалентну схему для моделювання однорідної лінії передачі у режимі холостого ходу, яка синтезована за другою формою Фостера (рис. 10).

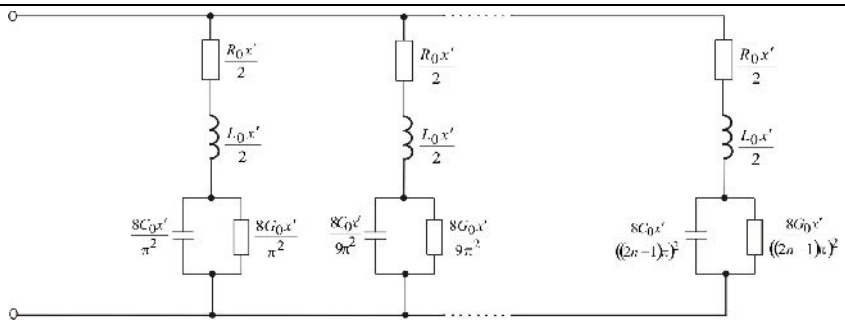


Рис. 10. Вдосконалена еквівалентна схема заміщення для моделювання однорідної лінії передачі у режимі холостого ходу, яка синтезована за другою формою Фостера

Режим короткого замикання. При короткому замикані в кінці однорідної довгої лінії опір навантаження дорівнює нулю $Z_н$=0. У той же момент падаюча та відбита хвилі струму буде мати однакові амплітуди, що призведе до збільшення струму наприкінці короткозамкненої лінії. Формула для вхідного комплексного опору однорідної довгої лінії в режимі короткого замикання можна записати у вигляді (50) [1–6].

$$Z_{вх.кз}(j\omega) = Zth\gamma x' = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}} th\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right) = \frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}} th\left(\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}\, x'\right) \quad (50)$$

У виразі вхідного комплексного опору (50) гіперболічний тангенс виразимо через теорему Міттаг-Леффлера за формулою (21) (перший метод), тоді вхідний комплексний опір однорідної довгої лінії запишемо у наступному вигляді

$$Z_{вх.кз}(j\omega) = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'}{\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right)^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{Z_0}\, 2\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'}{\sqrt{Y_0}\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right)^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Z_0 x'}{Z_0 Y_0 (x')^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} =$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{Z_0 Y_0 (x')^2 + \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2}{2Z_0 x'}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{Z_0 Y_0 (x')^2}{2Z_0 x'} + \frac{\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2}{2Z_0 x'}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{Y_0 x'}{2} + \frac{\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2}{2Z_0 x'}}, \quad (51)$$

Враховуючі у виразі (51) тільки перші 2*N* полюсів вхідний комплексний опір однорідної довгої лінії у режимі короткого замикання матиме вигляд (52)

$$Z_{вх.кз}(j\omega) = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{\frac{Y_0 x'}{2} + \frac{\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2}{2Z_0 x'}} = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{Y_n + \frac{1}{Z_n}} = \sum_{n=1}^{N} \frac{1}{Y_n + Y_n'} = \frac{1}{Y_1 + Y_1'} + \frac{1}{Y_2 + Y_2'} + \ldots + \frac{1}{Y_N + Y_N'}, \quad (52)$$

де

$$Y_n = \frac{Y_0 x'}{2}, \quad (53)$$

$$Z_n = \frac{2Z_0 x'}{\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2} = \frac{8Z_0 x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при } n \geq 1, \quad (54)$$

$$Y_n' = \frac{((2n-1)\pi)^2}{8Z_0 x'} \quad \text{при } n \geq 1. \quad (55)$$

Використовуючи вираз вхідного комплексного опору (52) у вигляді суми дробів, побудуємо модифіковану еквівалентну схему заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована за першою формою Фостера у режимі короткого замикання (рис. 11).

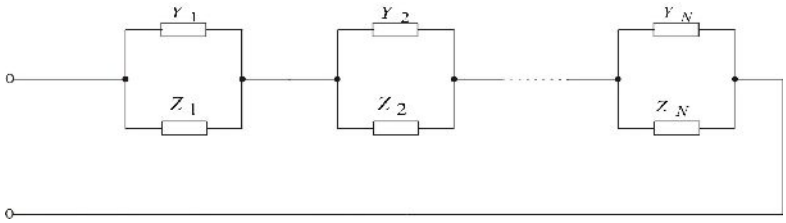


Рис. 11. Модифікована еквівалентна схема заміщення однорідної лінії передачі у вигляді суми дробів, яка синтезована по першій формі Фостера у режимі короткого замикання

Елементи модифікованої еквівалентної схеми заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована за першою формою Фостера у режимі короткого замикання можна визначити через її параметри Z_0 та Y_0 за формулами (53)–(55).

З урахуванням того, що $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$ та $Y_0 = G_0 + j\omega C_0$, вирази (53)–(55) можна представити у вигляді формул (56)–(58):

$$Y_n = \frac{Y_0 x'}{2} = \frac{G_0 x' + j\omega C_0 x'}{2} = \frac{G_0 x'}{2} + j\omega \frac{C_0 x'}{2}, \tag{56}$$

$$Z_n = \frac{8Z_0 x'}{((2n-1)\pi)^2} = \frac{8}{((2n-1)\pi)^2}\left(R_0 x' + j\omega L_0 x'\right) = \frac{8R_0 x'}{((2n-1)\pi)^2} + j\omega \frac{8L_0 x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при } n \geq 1, \tag{57}$$

$$Y_n' = \frac{((2n-1)\pi)^2}{8Z_0 x'} = \frac{((2n-1)\pi)^2}{\left(8R_0 x' + j\omega 8L_0 x'\right)} = \frac{1}{\dfrac{8R_0 x' + j\omega 8L_0 x'}{((2n-1)\pi)^2}} = \frac{1}{\dfrac{8R_0 x'}{((2n-1)\pi)^2} + j\omega \dfrac{8L_0 x'}{((2n-1)\pi)^2}} \quad \text{при } n \geq 1. \tag{58}$$

Звідки можна визначити електричні параметри елементів запропонованої еквівалентної схеми заміщення однорідної довгої лінії, яка синтезована по першій формі Фостера у режимі короткого замикання через її первині параметри R_0, L_0, C_0 та G_0.

$$R_n = \frac{8R_0 x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при } n \geq 1, \tag{59}$$

$$L_n = \frac{8L_0 x'}{((2n-1)\pi)^2} \quad \text{при } n \geq 1, \tag{60}$$

$$G_n = \frac{G_0 x'}{2}, \tag{61}$$

$$C_n = \frac{C_0 x'}{2}. \tag{62}$$

З урахуванням співвідношень (59)–(62) побудуємо вдосконалену еквівалентну схему для моделювання однорідної лінії передачі у режимі короткого замикання, яка синтезована по першій формі Фостера (рис. 12).

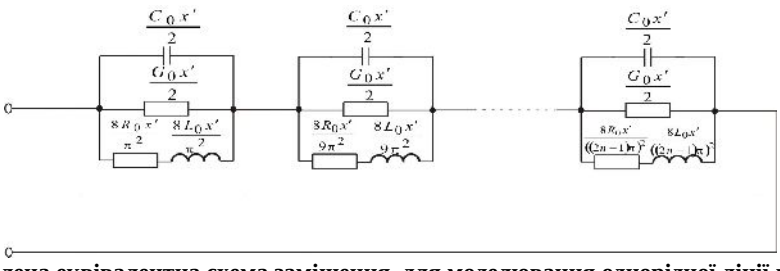


Рис. 12. Вдосконалена еквівалентна схема заміщення для моделювання однорідної лінії передачі у режимі короткого замикання, яка синтезована за першою формою Фостера

Формулу для вхідної комплексної провідності однорідної довгої лінії в режимі короткого замикання можна виразити через її комплексний вхідний опір (50), тоді

$$Y_{вх.кз}(j\omega) = \frac{1}{Z_{вх.кз}(j\omega)} = \frac{1}{\dfrac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}}\, th\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right)} = \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot \frac{1}{th\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right)} = \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot cth\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right). \tag{63}$$

Застосуємо теорему Міттаг-Леффлера за формулою (22) (другий метод) для виразу вхідної комплексної провідності однорідної довгої лінії в режимі короткого замикання (63), і отримаємо наступне співвідношення

$$\begin{aligned} Y_{вх.кз}(j\omega) &= \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'}{\left(\sqrt{Z_0 Y_0}\, x'\right)^2 + (n\pi)^2} \right) = \frac{\sqrt{Y_0}}{Z_0 \sqrt{Y_0}\, x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{Y_0}}{\sqrt{Z_0}} \cdot \frac{2\sqrt{Z_0}\sqrt{Y_0}\, x'}{Z_0 Y_0 x'^2 + (n\pi)^2} = \frac{1}{Z_0 x'} + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Y_0 x'}{Z_0 Y_0 x'^2 + (n\pi)^2} = \frac{1}{Z_0 x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0 Y_0 x'^2 + (n\pi)^2}{2Y_0 x'}} = \frac{1}{Z_0 x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0 Y_0 x'^2}{2Y_0 x'} + \dfrac{(n\pi)^2}{2Y_0 x'}} = \frac{1}{Z_0 x'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\dfrac{Z_0 x'}{2} + \dfrac{(n\pi)^2}{2Y_0 x'}}. \end{aligned} \tag{64}$$

Враховуючі у виразі (64) тільки перших $2N$ нулів вхідного комплексного опору однорідної довгої лінії у режимі короткого замикання, формула вхідної комплексної провідності матиме вигляд (65)

$$Y_{вх.кз}(j\omega)=\frac{1}{Z_0x'}+\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{\frac{Z_0x'}{2}+\frac{(n\pi)^2}{2Y_0x'}}=\frac{1}{Z_0x'}+\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{Z_n+\frac{1}{Y_n}}=\frac{1}{Z_0x'}+\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{Z_n+Z'_n}= \tag{65}$$

$$=\frac{1}{Z_0x'}+\frac{1}{Z_1+Z'_1}++\frac{1}{Z_2+Z'_2}+...+\frac{1}{Z_N+Z'_N},$$

де

$$Z_n=\frac{Z_0x'}{2}, \tag{66}$$

$$Y_n=\frac{2Y_0x'}{(n\pi)^2}\ \text{при}\ n\geq 1, \tag{67}$$

$$Z'_n=\frac{(n\pi)^2}{2Y_0x'}\ \text{при}\ n\geq 1. \tag{68}$$

Використовуючи вираз вхідної комплексної провідності (65) у вигляді суми дробів, побудуємо модифіковану еквівалентну схему заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована за другою формою Фостера у режимі короткого замикання (рис. 13).

Рис. 13. Модифікована еквівалентна схема заміщення однорідної лінії передачі у вигляді суми дробів, яка синтезована за другою формою Фостера у режимі короткого замикання

Елементи модифікованої еквівалентної схеми заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована по другій формі Фостера у режимі короткого замикання можна визначити через її параметри Z_0 та Y_0 за формулами (66)–(68).

Враховуючі, що $Z_0=R_0+j\omega L_0$ та $Y_0=G_0+j\omega C_0$ вирази (66)–(68) можна представити у вигляді формул (69)–(71):

$$Z_n=\frac{Z_0x'}{2}=\frac{R_0x'+j\omega L_0x'}{2}=\frac{R_0x'}{2}+j\omega\frac{L_0x'}{2}, \tag{69}$$

$$Y_n=\frac{2}{(n\pi)^2}(G_0x'+j\omega C_0x')=\frac{2G_0x'}{(n\pi)^2}+j\omega\frac{2C_0x'}{(n\pi)^2}\ \text{при}\ n\geq 1, \tag{70}$$

$$Z'_n=\frac{(n\pi)^2}{(2G_0x'+j\omega 2C_0x')}=\frac{1}{\frac{2G_0x'+j\omega 2C_0x'}{(n\pi)^2}}=\frac{1}{\frac{2G_0x'}{(n\pi)^2}+j\omega\frac{2C_0x'}{(n\pi)^2}}\ \text{при}\ n\geq 1. \tag{71}$$

Звідки можна визначити електричні параметри елементів запропонованої еквівалентної схеми заміщення однорідної довгої лінії, яка синтезована по другій формі Фостера у режимі короткого замикання через її первині параметри R_0, L_0, C_0 та G_0.

$$R_n=\frac{R_0x'}{2}, \tag{72}$$

$$L_n=\frac{L_0x'}{2}, \tag{73}$$

$$G_n=\frac{2G_0x'}{(n\pi)^2}\ \text{при}\ n\geq 1, \tag{74}$$

$$C_n=\frac{2C_0x'}{(n\pi)^2}\ \text{при}\ n\geq 1. \tag{75}$$

З урахуванням співвідношень (72)–(75) побудуємо вдосконалену еквівалентну схему для моделювання однорідної лінії передачі у режимі короткого замикання, яка синтезована по другій формі Фостера (рис. 14).

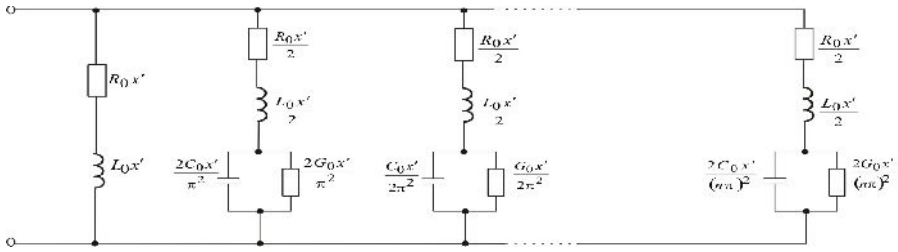


Рис. 14. Вдосконалена еквівалентна схема заміщення для моделювання однорідної лінії передачі у режимі короткого замикання, яка синтезована по другій формі Фостера

Навантажувальний режим. Дійсні струм та напруга у будь-якій точці лінії можуть бути розкладені на складові холостого ходу та короткого замикання, чим дуже зручно користуватись у розрахунках. Наприклад, для розрахунку навантажувальної лінії з втратами розподіл струму та напруги можна знайти по складовим напруг та струмів при холостому ході і короткому замикані в окремості, а потім геометрично сумуючи їх, отримати дійсні струми та напруги. Для розрахунку вхідного опору однорідної лінії передачі, коли лінія навантажена на довільний опір навантаження, зручно користуватись наступною формулою [2–6]:

$$Z_{вх}(j\omega)=\frac{\dot{U}_2 ch(\gamma x')+\dot{I}_2 Z sh(\gamma x')}{\dot{I}_2 ch(\gamma x')+\frac{\dot{U}_2}{Z} Z sh(\gamma x')}=\frac{Z_н+Z th(\gamma x')}{1+\frac{Z_н}{Z} th(\gamma x')}=\frac{Z_н+Z_{вх.кз}}{1+\frac{Z_н}{Z_{вх.хх}}}=Z_{вх.хх}\frac{Z_н+Z_{вх.кз}}{Z_н+Z_{вх.хх}}. \quad (76)$$

Вираз вхідного комплексного опору (76) у навантажувальному режимі представимо у вигляді суми двох дробів

$$Z_{вх}(j\omega)=\frac{1}{\frac{1}{Z_н}+\frac{1}{Z_{вх.хх}}}+\frac{1}{\frac{1}{Z_{вх.кз}}+\frac{1}{\frac{Z^2}{Z_н}}}. \quad (77)$$

Використовуючи вираз вхідного комплексного опору (77) у вигляді суми двох дробів, побудуємо модифіковану еквівалентну схему заміщення однорідної лінії передачі, яка синтезована за першою формою Фостера у навантажувальному режимі (рис. 15).

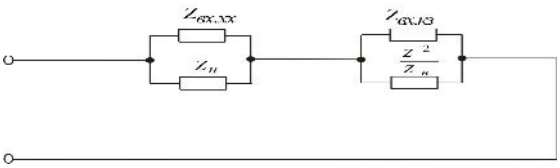


Рис. 15. Модифікована еквівалентна схема заміщення однорідної лінії передачі у вигляді суми двох дробів, яка синтезована по першій формі Фостера у навантажувальному режимі

Висновки. Для підвищення точності математичного опису параметрів і характеристик однорідної лінії передачі запропоновано два методи та вибрані адекватні їм математичні моделі, які засновані на теоремі Міттаг-Леффлера. Проведено моделювання однорідної лінії передачі у трьох режимах: режимі холостого ходу, режимі короткого замикання та навантажувальному режимі. Встановлено, що реалізація функцій вхідного комплексно опору та вхідної комплексної провідності однорідної лінії передачі на основі теореми Міттаг-Леффлера базується на їх представлені у вигляді суми простих дробів.

Побудовані модифіковані еквівалентні схеми заміщення однорідної лінії передачі, які синтезовані по першій та другій формі Фостера у режимах холостого ходу, короткого замикання та навантажувальному режимі.

Розроблені вдосконалені еквівалентні схеми заміщення для моделювання однорідної лінії передачі у режимах холостого ходу, короткого замикання та навантажувальному режимі, які синтезовані за першою та другою формі Фостера.

Отримано аналітичні вирази для визначення елементів модифікованих еквівалентних схем заміщення однорідної лінії передачі, а також запропоновані аналітичні вирази, що дозволяють провести розрахунки електричних параметрів елементів вдосконалених еквівалентних схем заміщення однорідної лінії передачі, які є функціями їх первинних (погонних) параметрів.

Аналіз математичної моделі однорідної лінії передачі на основі теореми Міттаг-Леффлера показав, що її еквівалентна схема заміщення з розподіленими електричними параметрами може бути безпосередньо замінена еквівалентними схемами заміщення із зосередженими електричними параметрами.

Література

1. Макаришкін Д.А. Моделювання пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі / Д.А. Макаришкін, В.В. Мартинюк, Ю.М. Бойко, О.М. Бриндак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький. – 2013. – № 2. – С. 188–195.

2. Атабеков Г.И. Основы теории цепей / Атабеков Г.И. – М. : Энергия, 1969. – 427 с.

3. Попов В.П. Основы теории цепей / Попов В.П. – М. : Высшая школа, 1985. – 496 с.

4. Песков С.Н. Основы теории линий передачи на высоких частотах. Часть 1: Режимы работы длинной линии / С.Н. Песков // Телеспутник. – 2009. – № 5. – С. 74–78.

5. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / Баскаков С.И. – М. : Высшая школа, 1982. – 152 с.

6. Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей / Улахович Д.А. – СПб : БХВ – Петербург, 2009. – 816 с.

7. Иваницкий А.М. Исследование прохождения экспофункциональных сигналов через линейные электрические цепи с распределенными параметрами / А.М. Иваницкий, Д.Г. Паску // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 2. – С. 5–9.

8. Murray R. Spiegel. Variables Complexes – cours et problemes / Murray R. Spiegel. – Schaum. Mac Graw-Hill, New-York, etc., 1973.

9. Soulier F. Modeling distributed parameter system with discrete element networks / F. Soulier, P. Lagonotte // In electronic proceedings of 15th international symposium on the mathematical theory of networks and systems, Aug. 2002.

References

1. Makaryshkin D.A. Modeliuvannia pasyvnoho filtra nyzhnikh chastot z vykorystanniam rehuliarnoi linii peredachi / D.A. Makaryshkin, V.V. Martyniuk, Yu.M. Boiko, O.M. Bryndak // Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. – Khmelnytskyi. – 2013. – # 2. – S. 188–195.

2. Atabekov H.Y. Osnovy teoryy tsepei / Atabekov H.Y. – M. : Enerhyia, 1969. – 427 s.

3. Popov V.P. Osnovy teoryy tsepei / Popov V.P. – M. : Vysshaia shkola, 1985. – 496 s.

4. Peskov S.N. Osnovy teoryy lynyi peredachy na vysokykh chastotakh. Chast 1: Rezhymy raboty dlynnoi lynyy / S.N. Peskov // Telesputnyk. – 2009. – # 5. – S. 74–78.

5. Baskakov S.Y. Radyotekhnycheskye tsepy s raspredelennymy parametramy / Baskakov S.Y. – M. : Vysshaia shkola, 1982. – 152 s.

6. Ulakhovych D.A. Osnovy teoryy lyneinykh elektrycheskykh tsepei / Ulakhovych D.A. – SPb : BKhV – Peterburh, 2009. – 816 s.

7. Yvanytskyi A.M. Yssledovanye prokhozhdenyia ekspofunktsyonalnykh syhnalov cherez lyneinye elektrycheskye tsepy s raspredelennymy parametramy / A.M. Yvanytskyi, D.H. Pasku // Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. – 2008. – # 2. – S. 5–9.

8. Murray R. Spiegel. Variables Complexes – cours et problemes / Murray R. Spiegel. – Schaum. Mac Graw-Hill, New-York, etc., 1973.

9. Soulier F. Modeling distributed parameter system with discrete element networks / F. Soulier, P. Lagonotte // In electronic proceedings of 15th international symposium on the mathematical theory of networks and systems, Aug. 2002.

Рецензія/Peer review : 27.09.2017 р. Надрукована/Printed :28.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ю.М. Бойко

УДК 004.93

Н.С. СВИРНЕВСКИЙ
Хмельницкий национальный университет

АЛГОРИТМ ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОЛОЖЕНИЯ КАМЕРЫ ПО ОСОБЫМ ТОЧКАМ

В статье описывается алгоритм 3D-реконструкции по изображениям с определением положения камеры по особым точкам, который есть решением одной из множества задач, реализуемых через композицию матриц аффинных преобразований в однородных координатах. Алгоритм описан для простейшего случая ортогонального проецирования, когда взаимное положение камер определяется только 2-я параметрами. Однако этот алгоритм может быть легко обобщен для случаев, когда взаимное положение камер определяется большим количеством параметров, включая и центральное проецирование. Особые точки изображений выбираются и сопоставляются по алгоритму, универсальному для всех разновидностей точек.

Ключевые слова: 3D-реконструкция, особые точки, матрица, преобразование, алгоритм.

N.S. SVIRNEVSKYI
Khmelnytskyi National University

ALGORITHM FOR THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION WITH DETERMINATION OF POSITION OF THE CHAMBER ON SPECIAL POINTS

This article describes an algorithm for 3D-reconstruction of the images with the determination of the camera position on special points, which is the decision of one of the many problems to be implemented through the composition of the matrix of affine transformation in homogeneous coordinates. The algorithm is described in the simplest case of an orthogonal projection, when the relative position of the cameras is determined by only 2 parameters. However, the algorithm can be easily generalized to cases where the relative position of the cameras is determined by a large number of options, including a central projection. Specific points of images are selected and compared according to an algorithm that is universal for all varieties of points.

Keywords: 3D-reconstruction, special points, matrix, transformation, algorithm.

Введение

Трехмерная реконструкция – это процесс получения 3D объектов на основе изображений. На вход алгоритма обработки подается набор из нескольких изображений (два или более), результатом работы которого является 3D фотография (рис. 1). Поскольку изображения получены из разных точек наблюдения, то для получения соответствия между точками изображения необходимо определить (знать) параметры аппарата проецирования. Эти параметры могут быть определены через решение системы уравнений [1] по известному положению особых точек изображений. Особой точкой изображения называется точка изображения, окрестность которой существенно отличается от окрестности любой другой точки изображения.

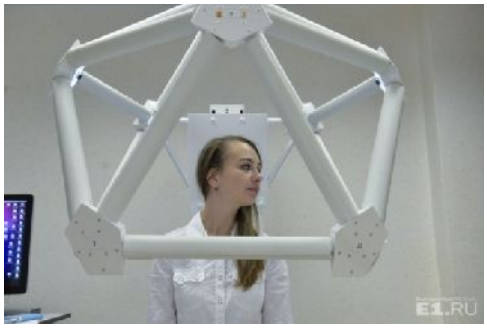


Рис. 1. Система 3D видеонаблюдения

Анализ исследований и публикаций

Сопоставление изображений является одним из фундаментальных аспектов многих задач компьютерного зрения, таких как распознавание объектов, построение трёхмерной сцены на основе нескольких изображений, создание стереопары, создание панорамных изображений, motion tracking (слежение за объектом в видеопоследовательности) и так далее.

В 1981 году с выходом работы Моравеца [2] начались исследования сопоставления изображений с помощью нахождения особых точек. На протяжении уже более чем 30 лет было разработано множество методов решения этой задачи [2–5]. По причине того, что область знаний, решающая подобные проблемы, ещё молода, не существует определённого универсального метода, идеально подходящего для всех задач такого рода. Однако, существуют методы решения более узких задач, каждый из которых будет показывать лучшие результаты в зависимости от использования для конкретной задачи.

В предыдущих публикациях [1, 6, 7] автора этой статьи на основе достаточно наглядного и простого практического примера (сканирование рупорной антенны) демонстрируется механизм аффинных преобразований в пространстве. Рассматриваются прямая задача (построение изображений рупорной антенны) и обратная – восстановление параметров рупорной антенны по одному ее изображению [7] и 2-м

изображениям [1]. В статье [1] на основе аффинных преобразований описывается алгоритм решения задачи 3D-реконструкции объекта по 2-м изображениям для случая, когда положение камеры известно. Такая задача находит применение, например, при панорамной съемке, где камеры фиксированы (см. рис. 1).

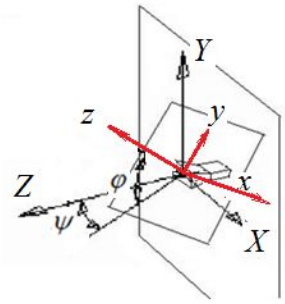
Формулирование цели

При съемках объекта фотографом с разных позиций положение камеры обычно не фиксируется. Как определить положение камеры непосредственно по изображениям? Для этого необходимо определить координаты характерных соответствующих точек, чтобы решить систему уравнений аффинных преобразований для пересчета координат в параметры положения камеры.

Ставится задача дополнить алгоритм, изложенный в статье [1], для случая, когда положение камеры неизвестно. Основная часть этой задачи заключается в разработке алгоритма детектирования особых точек изображений и определения соответствующих точек на изображениях

Изложение основного материала

Суть математического решения задачи восстановления пространственного объекта по его изображениям заключается в описании проекций точек объекта в различных системах координат (СК) и в установлении взаимосвязи между этими СК (рис. 2). При проецировании пространственного объекта на плоскость теряется одна размерность (координата Z). В статье [1] была определена система уравнений (1), которые устанавливают взаимосвязь между точками изображений и позволяют восстановить координату Z, если известно направление проецирования (2 угла, которые определяют положение камеры).



$$x = X\cos\psi - Z\sin\psi$$
$$y = X\sin\psi\sin\varphi + Y\cos\varphi + Z\cos\psi\sin\varphi \quad \textbf{(1)}$$
$$z = 0$$

Рис. 2. Установление взаимосвязи между точками объекта на 2-х изображениях

Систему уравнений (1) можно использовать для нахождения координаты *Z* каждой точки на главном изображении – точки с координатами (*X*,*Y*). Решение возможно, если известны параметры преобразования (значения углов) и координаты соответствующей точки (*x*,*y*) на вспомогательном изображении. Простейший алгоритм решения этой задачи:

1. Для каждой точки главного изображения (*X*,*Y*) определяем соответствующую точку на вспомогательном изображении (*x*,*y*), осуществляя итерацию координаты Z
2. Соответствующая точка найдена, если совпадают 3 цвета точек (RGB) на обоих изображениях.
3. Вместе с соответствующей точкой определяется и координата *Z*.

Для тестирования алгоритма восстановления 3D-объекта по изображениям была разработана программа [1], которая обеспечивает загрузку файлов изображений (рис. 3) и обработка точек изображений для определения координаты Z (рис. 4).

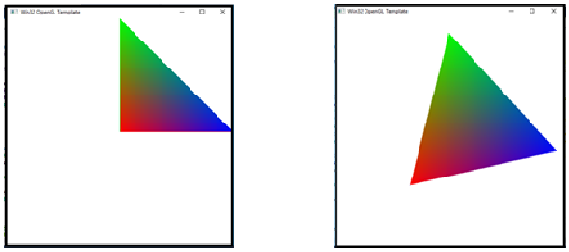


Рис. 3. Загрузка файлов изображений

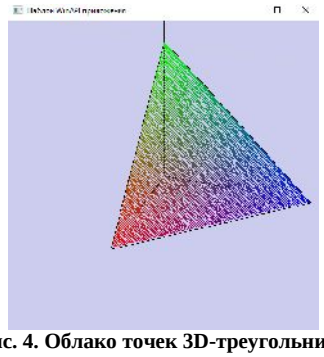


Рис. 4. Облако точек 3D-треугольника

Как определить положение камеры непосредственно по изображениям? Для этого необходимо решить систему уравнений для пересчета координат соответствующих точек одного изображения в координаты другого относительно параметров положения. При нашей упрощенной постановке задачи параметрами положения являются 2 угла.

$$x_1 = X_1\cos\psi - Z_1\sin\psi$$
$$y_1 = X_1\sin\psi\sin\varphi + Y_1\cos\varphi + Z_1\cos\psi\sin\varphi \quad (2)$$

В этой системе уравнений кроме углов неизвестной является еще координата *Z*. Следовательно, для решения задачи уравнений недостаточно. Запишем систему уравнений для еще одной пары соответствующих точек:

$$x_2 = X_2 \cos\psi - Z_2 \sin\psi$$
$$y_2 = X_2 \sin\psi \sin\varphi + Y_2 \cos\varphi + Z_2 \cos\psi \sin\varphi \quad (3)$$

Получили 4 уравнения с 4-я неизвестными. Система решается, если известны координаты двух соответствующих пар точек изображений. Т.о., для определения положения камеры необходимо:

1. Осуществить поиск особых точек на каждом изображении.
2. Установить соответствие между особыми точками изображений.
3. Определить параметры положения камеры – 2 угла в системе уравнений(1).

Существуют множество алгоритмов определения особых точек, предназначенных для разных областей применения. В них были определены следующие требования, которым должны удовлетворять особые точки:

1. Отличимость: особая точка должна выделяться на фоне и быть уникальной в своей окрестности.
2. Инвариантность: выбор особых точек должен быть независимым от аффинных преобразований.
3. Стабильность: выбор особых точек должен быть устойчив к шуму и ошибкам.
4. Уникальность: помимо локального отличия, особая точка должна также обладать свойством глобальной уникальности для того, чтобы улучшить различимость повторяющихся паттернов.
5. Интерпретируемость: особые точки должны определяться таким образом, чтобы их можно было использовать для анализа соответствий и лучшей интерпретации изображения.

Ниже изложен алгоритм и фрагменты программы нахождения характерных особенностей особых точек. Для определения особых точек и установления соответствия между точками на разных изображениях необходимо предварительно обработать изображение. Обработка изображения заключается в следующем:

1. Цветное 3-байтное изображение преобразуется в 1-байтное изображение (с оттенками серого цвета).
2. Цвета пикселов усредняются (сглаживаются) через матричные фильтры обработки изображений.

В компьютерном представлении широко распространённая серая шкала использует на каждый пиксел изображения один байт (8 бит) информации. Такая шкала передаёт 256 оттенков (градаций) серого цвета, или яркости (значение 0 представляет чёрный цвет, а значение 255 – белый). В цветовых пространствах яркость Y' вычисляется по формуле

$$Y' = 0.299R + 0.587G + 0.114B.$$

Матричный фильтр обработки изображений – это матрица коэффициентов, которая «умножается» на значение пикселей изображения для получения требуемого результата. В методах фильтрации при оценке реального сигнала в некоторой точке кадра принимают во внимание некоторое множество (окрестность) соседних точек, воспользовавшись определенной похожестью сигнала в этих точках. Эффективное шумоподавление можно осуществить, если влияние пикселей на результат будет уменьшаться с увеличением расстояния от обрабатываемого. Этим свойством обладает гауссовский фильтр:

0,000789	0,006581	0,013347	0,006581	0,000789
0,006581	0,054901	0,111345	0,054901	0,006581
0,013347	0,111345	0,225821	0,111345	0,013347
0,006581	0,054901	0,111345	0,054901	0,006581
0,000789	0,006581	0,013347	0,006581	0,000789

.

Особые точки характеризуются направлением наибольшего увеличения яркости и величиной её изменения в этом направлении, которые вычисляются с помощью оператора Собеля. Оператор использует ядра 3x3, с которыми сворачивают исходное изображение для вычисления приближённых значений производных по горизонтали и по вертикали. Пусть A – это исходное изображение, а Gx и Gy – два изображения, на которых каждая точка содержит приближённые производные по x и по y. Они вычисляются следующим образом:

$$\mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * \mathbf{A} \quad \text{and} \quad \mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * \mathbf{A}$$

В каждой точке изображения приближённое значение величины градиента можно вычислить путём использования полученных приближенных значений производных. Используя эту информацию, мы можем также вычислить направление градиента:

$$\mathbf{G} = \sqrt{{\mathbf{G}_x}^2 + {\mathbf{G}_y}^2} \qquad \mathbf{\Theta} = \arctan\left(\frac{\mathbf{G}_y}{\mathbf{G}_x}\right)$$

Фрагменты программной реализации

1. Считывается растр изображения из BMP файла в массив *rgb*:

```
…
RGBQUAD **rgb = new RGBQUAD*[bmiHeader.biWidth];
        for (int i = 0; i < bmiHeader.biWidth; i++) {
                rgb[i] = new RGBQUAD[bmiHeader.biHeight];
        }
        int kr = (int)bmiHeader.biWidth * 3 % 4;
        if (kr != 0) { kr = 4 - kr; }
        for (int j = 0; j < bmiHeader.biHeight; j++) {
```

```
                for (int i = 0; i < bmiHeader.biWidth; i++) {
                        rgb[i][j].rgbBlue = getc(pFile);
                        rgb[i][j].rgbGreen = getc(pFile);
                        rgb[i][j].rgbRed = getc(pFile);
                }
                // пропускаем последние 1-3 байта в конце строки для обеспечения кратности 4
                for (int i = 0; i < kr; i++) {getc(pFile);}
        }
```

2. Цветное 3-байтное изображение преобразуется в 1-байтное изображение (с оттенками серого цвета). Точки изображения сохраняются в 4-м резервном свойстве переменной *rgb[i][j]*:

```
void Bmp::RgbToGray (RGBQUAD **rgb, int mx, int my) {
        int i, j;
        for (j = 0; j < my; j++)  {
                for (i = 0; i < mx; i++) {
rgb[i][j].rgbReserved = rgb[i][j].rgbRed*0.299 + rgb[i][j].rgbGreen*0.587 + rgb[i][j].rgbBlue *
0.114;}}
}
```

3. Цвета пикселов усредняются (сглаживаются) в соответствии с ближайшими пикселами рисунка матрицей 5*5. В резервный байт перезаписываются обновленные цвета точек:

```
void Bmp::Filter(RGBQUAD **rgb, int mx, int my){
        int i, j, n, m;
        RGBQUAD **rgbtmp = new RGBQUAD*[mx];
        double g[5][5];
g[0][0] = 0.000789; g[1][0] = 0.006581; g[2][0] = 0.013347; g[3][0] = 0.006581; g[4][0] =
0.000789;
g[0][1] = 0.006581; g[1][1] = 0.054901; g[2][1] = 0.111345; g[3][1] = 0.054901; g[4][1] =
0.006581;
g[0][2] = 0.013347; g[1][2] = 0.111345; g[2][2] = 0.225821; g[3][2] = 0.111345; g[4][2] =
0.013347;
g[0][3] = 0.006581; g[1][3] = 0.054901; g[2][3] = 0.111345; g[3][3] = 0.054901; g[4][3] =
0.006581;
g[0][4] = 0.000789; g[1][4] = 0.006581; g[2][4] = 0.013347; g[3][4] = 0.006581; g[4][4] =
0.000789;
        for (i = 0; i < mx; i++) {rgbtmp[i] = new RGBQUAD[my];}
        for (j = 2; j < my - 2; j++)  {
                for (i = 2; i < mx - 2; i++) {
                        rgbtmp[i][j].rgbReserved = 0;
                        for (m = 0; m < 5; m++)  {
                                for (n = 0; n < 5; n++) {
                                        rgbtmp[i][j].rgbReserved = rgbtmp[i][j].rgbReserved + rgb[i
- (2 - n)][j - (2 - m)].rgbReserved*g[n][m];}}
                }
        }
        for (j = 2; j < my - 2; j++)  {
                for (i = 2; i < mx - 2; i++) {
                        rgb[i][j].rgbReserved = rgbtmp[i][j].rgbReserved;}
        }
        delete rgbtmp;
}
```

4. Реализуется поиск градиентов характеристик точек с помощью оператора Собеля и осуществляется отбор особых точек по пороговым значениям этих характеристик:

```
void Bmp::Gradient(RGBQUAD **rgb, int mx, int my){
        int i, j, n, m, grdX, grdY, grdX1, grdY1, grdR, grdR1, grdC;
        double grdCos, angle;  // cos угла градиента
        double gx[3][3];  // фильтр Собеля для определения градиента вдоль x
        gx[0][0] = -1.0; gx[1][0] = 0.0; gx[2][0] = 1.0;
        gx[0][1] = -2.0; gx[1][1] = 0.0; gx[2][1] = 2.0;
        gx[0][2] = -1.0; gx[1][2] = 0.0; gx[2][2] = 1.0;
        double gy[3][3];  // фильтр Собеля для определения градиента вдоль y
        gy[0][0] = 1.0; gy[1][0] = 2.0; gy[2][0] = 1.0;
        gy[0][1] = 0.0; gy[1][1] = 0.0; gy[2][1] = 0.0;
        gy[0][2] = -1.0; gy[1][2] = -2.0; gy[2][2] = -1.0;
        RGBQUAD **rgbtmp = new RGBQUAD*[mx]; // Создаем массив для градиентов характеристик точек
        for (i = 0; i < mx; i++) {rgbtmp[i] = new RGBQUAD[my];}
        // первые производные
        for (j = 3; j < my - 3; j++)  {
                for (i = 3; i < mx - 3; i++) {
                        grdX = 0;
                        grdY = 0;
                        for (m = 0; m < 3; m++)  {
                                for (n = 0; n < 3; n++) {
        grdX = grdX + rgb[i - (1 - n)][j - (1 - m)].rgbReserved * gx[n][m];  // градиент вдоль x
        grdY = grdY + rgb[i - (1 - n)][j - (1 - m)].rgbReserved * gy[n][m];  // градиент вдоль y
                                }
                        }
                        grdR = sqrt(pow(grdX, 2) + pow(grdY, 2)); // градиент результирующий
                        if (grdR) {
                                grdCos = (double) grdX / grdR;  // косинус угла градиента
            angle = (grdY >= 0) ? acos(grdCos) : 6.28 - acos(grdCos); // угол градиента
// Нормализуем (значения должны быть в пределах 0-255) и запоминаем характеристики пикселя
```

```
                        rgbtmp[i][j].rgbRed = grdR / 6; // запоминаем градиент текущего пиксела
                        rgbtmp[i][j].rgbGreen = angle * 180/6.28;
// запоминаем угол градиента текущего пикселя (1/2 угла с учетом ограничения 0-255)
                        }
                        else
                        {
                        rgbtmp[i][j].rgbRed = 0; // запоминаем градиент текущего пиксела
                        rgbtmp[i][j].rgbGreen = 0; // запоминаем угол градиента текущего пикселя
                        }
                }
        }
        // вторые производные
        for (j = 4; j < my - 4; j++)  {
                for (i = 4; i < mx - 4; i++) {
                        grdX = 0; grdY = 0; grdX1 = 0;grdY1 = 0;grdC = 0;
                        for (m = 0; m < 3; m++)  {
                                for (n = 0; n < 3; n++) {
                        grdX = grdX + rgbtmp[i - (1 - n)][j - (1 - m)].rgbRed * gx[n][m];
// изменение величины градиента  вдоль x
                        grdY = grdY + rgbtmp[i - (1 - n)][j - (1 - m)].rgbRed * gy[n][m];
// изменение величины градиента  вдоль y
                // Через фильтр Собеля определяем изменение направления угла градиента
                        grdX1 = grdX1 + rgbtmp[i - (1 - n)][j - (1 - m)].rgbGreen * gx[n][m];
// изменение направления угла градиента вдоль x
                        grdY1 = grdY1 + rgbtmp[i - (1 - n)][j - (1 - m)].rgbGreen * gy[n][m];
// изменение направления угла градиента вдоль y
                                        continue;
                                }
                        }
grdR = sqrt(pow(grdX, 2) + pow(grdY, 2)); // изменение величины градиента
grdR1 = sqrt(pow(grdX1, 2) + pow(grdY1, 2)); // изменение направления угла градиента
// Нормализуем (значения должны быть в пределах 0-255) и запоминаем характеристики пикселя
rgbtmp[i][j].rgbBlue = grdR; // запоминаем изменение величины градиента
rgbtmp[i][j].rgbReserved = grdR1/4; // запоминаем изменение направления угла градиента
                                continue;
                }
        }
        int angl, za, it, jt, r=10;
        // Проверка условий
        for (j = r; j < my - r; j++)  {
                for (i = r; i < mx - r; i++) {
        angl = 2*rgbtmp[i][j].rgbGreen;
//угол градиента текущего пикселя(1 / 2 угла с учетом ограничения 0 - 255)
                        if (angl < 23)za = 1;                          //  0 (360) градусов
                        if (angl > 23  && angl <= 67 )za = 2;       //  45 градусов
                        if (angl > 67  && angl <= 102)za = 3;       //  90 градусов
                        if (angl > 102 && angl <= 157)za = 3;       //  135 градусов
                        if (angl > 157 && angl <= 202)za = 5;       //  180 градусов
                        if (angl > 202 && angl <= 247)za = 6;        //  225 градусов
                        if (angl > 247 && angl <= 292)za = 7;       //  270 градусов
                        if (angl > 292 && angl <= 337)za = 8;       //  315 градусов
                        if (angl > 337)za = 1;                        //  0 (360) градусов
                        switch (za){
                        case 1:  it = i + r;  jt = j; break;  //  0 (360) градусов
                        case 2:   it = i + r;  jt = j + r; break; //  45 градусов
                        case 3:   it = i; jt = j + r; break;       //  90 градусов
                        case 4:   it = i - r; jt = j + r;  break;  //  135 градусов
                        case 5:   it = i - r; jt = j;  break;      //  180 градусов
                        case 6:   it = i - r; jt = j - r; break;   //  225 градусов
                        case 7:   it = i;  jt = j - r;   break;    //  270 градусов
                        case 8:   it = i + r;  jt = j - r; break;   //  315 градусов
                        }
        int prgrd = 10; // порог по градиенту
        int prgrd1 = 30; // порог по изменению величины градиента (точка перегиба)
        int prgrd2 = 20; // порог по сравнению градиентов на расстоянии r
        int prangle = 15; // порог по изменению направления угла градиента

rgb[i][j].rgbReserved = (rgbtmp[i][j].rgbRed >= prgrd
                        && rgbtmp[i][j].rgbBlue <= prgrd1
                        && rgbtmp[i][j].rgbRed - rgbtmp[it][jt].rgbRed >= prgrd2
                        && rgbtmp[i][j].rgbReserved >= prangle
                                        )
                                        ? 1 : 0;
                }
        }
}
```

5. Все точки изображения выводятся на экран, особые точки выделяются на изображении по цвету и размерам (рис. 5).

```
                                clr     =     RGB(rgb[i][j].rgbRed,     rgb[i][j].rgbGreen,
rgb[i][j].rgbBlue);
                                SetPixel(hdc, p.x, p.y, clr);

                                if (rgb[i][j].rgbReserved == 1){
                                        clr = RGB(0, 0, 0);
```

```
                    //clr = RGB(255, 255, 255);
                    //SetPixel(hdc, p.x, p.y, clr);
                     Ellipse(hdc, p.x - 4, p.y - 4, p.x + 4, p.y + 4);
}
```

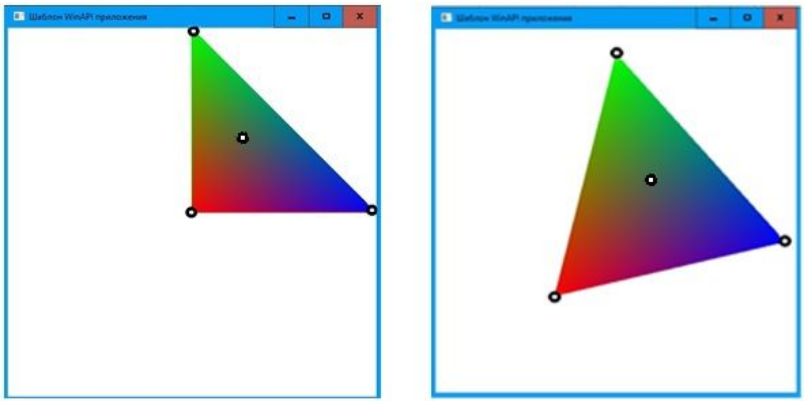


Рис. 5. Выделение программой особых точек изображений

Кроме выделения особых точек на изображениях необходимо установить соответствие между проекциями одной и той же точки на различных изображениях. Для однозначного решения этой задачи одних лишь количественных градиентных характеристик яркости точек может быть недостаточно. Необходимо определять вид каждой точки. Так различают точки пятна и угловые точки. В зависимости от количества пересекаемых граней существуют разные виды уголков: L-, Y- (или T-) и X-связные (рис. 6).

Рис. 6. Разновидности угловых точек

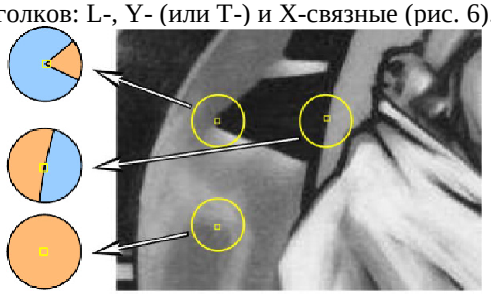


Рис. 7. Особые точки – контурные и угловые

Среди отфильтрованных по градиентам особых точек могут быть те, которые расположены на границе контуров, и угловые (рис. 7). Угловые точки являются наиболее характерными. Углы определяются сегментацией круговых окрестностей в схожие (оранжевые) и непохожие (синие) участки.

Особенность угловой точки должно подчеркивать все, что может:

1. Наиболее интенсивный переход цвета от одной к другой области.
2. Области, которые граничат, должны быть равномерными по цвету (или одинаковыми по текстуре) и большими по площади.
3. Угловая точка должна характеризоваться резким изменением угла касательной, перед точкой и далее линия должна изменяться монотонно.
4. Примыкающие к точке линии должны быть достаточно длинными.

Особенность точки-пятна:

1. Небольшая замкнутая область с интенсивным переходом цвета от одной области к другой.
2. Форма пятна имеет правильную форму (окружность, эллипс, квадрат).
3. Точка находится по центру фигуры.

Воспользуемся так называемым алгоритмом SUSAN. Углы находятся там, где относительная площадь схожих участков (similar USAN) достигает локального минимума (ниже определенного порога). Отдалимся от переходного участка изменения интенсивности цвета, создав вокруг тестируемой особой точки окружность радиуса 3-4 пиксела. Определяем абсолютные значения разностей интенсивностей цвета точек на противоположных концах диаметрального отрезка. Если разность близка к нулю (ниже порогового значения), то точки находятся на одном участке. Если разность большая (выше порогового значения), то точки находятся на разных участках. Пошагово изменяем положение диаметрального отрезка, вращая его на угол до 180 градусов. Если разность для всех положений близка к нулю (ниже порогового значения), то особая точка является светлым (темным) пятном. Если количество положений с большой и маленькой разностями интенсивностей в диаметрально противоположных точках одинакова, то особая точка является вершиной прямого угла, при других отношениях количества точек углы меньше или больше (до 180 градусов). Если разность для всех положений большая (выше порогового значения), то особая точка является либо точкой границы контура, либо вершиной, в которой сходятся 3-и и более участков различного цвета. Для последнего случая нужен дополнительный анализ.

На основании вышеизложенного предлагается следующий алгоритм выбора точки-угла и точки пятна. Вокруг тестируемой точки определяем интенсивности точек на концентричных окружностях 2-х радиусов (чтобы не ловились случайные одиночные точки необходимо сравнивать не с интенсивностью

тестируемой точки, а с интенсивностью точек на окружности меньшего радиуса). Предполагается, что точки окружности меньшего (большего) радиуса находятся в пределах (за пределами) внутреннего участка. Сканируем точки обеих окружностей с определенным угловым шагом. Разность интенсивностей тестируемой точки и точек на меньшей (большей) окружности должна быть стабильно низкой (высокой). Если для всех сканируемых точек выполняются эти условия, то тестируемая точка находится в области пятна. Окружности можно заменить 8-ю направлениями (4-е основные направления и 4-е диагональные). Например, изменение интенсивности точек внутреннего (внешнего) участка определяется матрицей 3*3 (матрицей 5*5).

По каждому из 8 направлений вокруг точки сравниваем величину градиентных характеристик (в простейшем случае яркости) точки dR;

Если dR> Pmax, тогда kmax++

Если dR< Pmin, тогда kmin++.

Порог Pmax определяет, что интенсивность точек вне угла резко изменяется. Порог Pmin определяет, что в пределах сегмента угла точки однородны – имеют одинаковую интенсивность.

При kmax=kmin=4 – угол 180 градусов, т.е. точка является контурной, но не угловой.

При kmax>4 и kmin=8 – kmax точка является вершиной угла меньше 180 градусов.

При kmax=8 точка является пятном. Пятно может быть особой точкой в случае, если область вокруг нее является однородной. Поэтому точки вокруг пятна необходимо проверить на однородность (dR< Pmin). При этом все точки по 7 направлениях сравниваются с точкой по первому направлению.

Выводы

Рассмотренный в статье алгоритм решения задачи трехмерной реконструкции с определением положения камеры по особым точкам прост и доступен для понимания, поскольку представлен как решение одной из множества задач, реализуемых через композицию матриц аффинных преобразований в однородных координатах. Особые точки изображений выбираются и сопоставляются по алгоритму, универсальному для всех разновидностей точек.

В статье алгоритм описан для простейшего случая ортогонального проецирования, когда взаимное положение камер определяется только 2-я параметрами. Однако этот алгоритм может быть легко обобщен для случаев, когда взаимное положение камер определяется большим количеством параметров, включая и центральное проецирование.

Литература

1. Свирневский Н.С. Алгоритм реконструкции трехмерной модели по изображениям / Н. С. Свирневский // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 2. – С. 212–218.

2. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance // In International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Canada. – 1981. – P. 785–790.

3. Жук Д.В. Восстановление трёхмерной модели сцены по цифровым изображениям / Д.В. Жук, А.В. Тузиков, А.В. Бородач // Искусственный интеллект. – 2006. – № 2. – С. 142–146.

4. Аленин В. А. Трехмерная реконструкция объектов из последовательности изображений / В.А. Аленин // Молодой ученый. – 2011. – № 3. Т. 1. – С. 33–36.

5. Борисенко Д.И. Методы поиска угловых особенностей на изображениях / Д.И. Борисенко // Молодой ученый. – 2011. – № 5. Т. 1. – С. 120–123.

6. Свирневский Н.С. Основы разработки графических приложений / Н.С. Свирневский, С.С. Ковальчук. – Хмельницкий : ХНУ, 2015. – 270 с.

7. Свирневский Н.С. Восстановление параметров пространственного объекта по изображению / Н.С. Свирневский // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 6. – С. 74–78.

References

1. Svyrnevskyi N.S. Alhorytm rekonstruktsyy trekhmernoi modely po yzobrazhenyiam / N. S. Svyrnevskyi // Herald of Khmelnytsky National University. – 2017. – # 2. – S. 212–218.

2. Moravec H. Rover visual obstacle avoidance // In International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Canada. – 1981. – P. 785–790.

3. Zhuk D.V. Vosstanovlenye trekhmernoi modely stseny po tsyfrovym yzobrazhenyiam / D.V. Zhuk, A.V. Tuzykov, A.V. Borodach // Yskusstvennyi yntellekt. – 2006. – # 2. – S. 142–146.

4. Alenyn V. A. Trekhmernaia rekonstruktsyia obektov yz posledovatelnosty yzobrazhenyi / V.A. Alenyn // Molodoi uchenyi. – 2011. – # 3. T. 1. – S. 33–36.

5. Borysenko D.Y. Metody poyska uhlovykh osobennostei na yzobrazhenyiakh / D.Y. Borysenko // Molodoi uchenyi. – 2011. – # 5. T. 1. – S. 120–123.

6. Svyrnevskyi N.S. Osnovy razrabotky hrafycheskykh prylozhenyi / N.S. Svyrnevskyi, S.S. Kovalchuk. – Khmelnytskyi : KhNU, 2015. – 270 s.

7. Svyrnevskyi N.S. Vosstanovlenye parametrov prostranstvennoho obekta po yzobrazhenyiu / N.S. Svyrnevskyi // Herald of Khmelnytsky National University. – 2011. – # 6. – S. 74–78.

Рецензія/Peer review : 14.02.2017 р. Надрукована/Printed :24.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатый Р.В.

УДК 004.4

М.В. СТАВНІЙЧУК, О.В. МАЗУРЕЦЬ, Т.К. СКРИПНИК
Хмельницький національний університет

ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ РЕДАКТОР ЦИФРОВИХ КРЕСЛЕНЬ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ВАЛІВ У AUTODESK INVENTOR

У статті розглянуто спосіб поєднання технології типових елементів проектування із властивостями об'єктно-орієнтованого підходу при роботі з САПР Autodesk Inventor. Розглянуто інформаційну технологію й відповідну програмну реалізацію даного методу – об'єктно-орієнтований редактор креслень. Розроблений об'єктно-орієнтований редактор креслень позиціонується як додаток для розширення функціональності Autodesk Inventor. Він дозволяє зручним чином інтерактивно формувати образ деталі шляхом вибору складових образу деталі та їх параметрів, й забезпечує взаємодію з САПР Autodesk Inventor для одержання набору інженерних креслень та 3D-моделі валу. Запропонований підхід дозволяє більш швидко та наочно одержати набір інженерних креслень й 3D-модель деталі в Autodesk Inventor, ніж стандартні засоби роботи з моделями деталей машин.

Ключові слова: 3D-модель, креслення, САПР, об'єктно-орієнтований підхід, Autodesk Inventor.

M. STAVNIICHUK, O. MAZURETS, T. SKRYPNYK
Khmelnytsky National University

OBJECT-ORGANIZED EDITOR OF DIGITAL DRAWINGS FOR SHAFT MODELS FORMING IN AUTODESK INVENTOR

Article reviews the method of combining the technology of standard design elements with the properties of the object-oriented approach when working with CAD system Autodesk Inventor. Reviewed information technology and the corresponding software implementation of this method is an object – oriented drawing editor. Developed object-oriented drawing editor is positioned as an application to extend the functionality of Autodesk Inventor. It allows a convenient way to interactively shape the image details by selecting constituents of image details and their parameters, and provides interoperability with CAD Autodesk Inventor to receive a set of engineering drawings and 3D models of the shaft. The proposed approach allows more quickly and clearly a set of engineering drawings and 3D part model in Autodesk Inventor than standard tools to work with models of machine parts.

Keywords: 3D-model, drawing, CAD, object-oriented approach, Autodesk Inventor.

Постановка проблеми в загальному вигляді

На сучасному етапі розвитку у жодній галузі науки чи виробництва неможливо обійтися без використання комп'ютерної техніки та пакетів програм, які допомагають працювати. Зокрема, розвиток сучасного машинобудування неможливий без наявності надійних та ефективних систем автоматизації проектування (САПР), призначених для створення та редагування цифрових креслень. Наразі через постійно зростаючі вимоги до функціонального навантаження спеціалізованих програм для створення креслень, а також їх недостатню ефективність, залишається актуальним питання розвитку даного напряму [1]. Складність вирішуваних САПР задач і наявність значної кількості форматів зберігання цифрових креслень наряду з типовістю виконуваних робіт і низьким рівнем автоматизації процесу проектування роблять актуальним як створення нових САПР, так і удосконалення існуючих [2]. Причому удосконалення існуючих САПР проводиться переважно шляхом створення різноманітних розширень, які покращують роботу базових САПР широкого застосування.

Проектування цифрового креслення деталі має на меті візуалізацію, збереження та передачу інформації про деталь. При розробці конструкторської документації до деталей машин засобами класичних САПР для створення 3D-моделі зазвичай необхідно проведення всього комплексу дій з геометричного моделювання та визначення геометричних й технологічних параметрів, частина з яких зазвичай є достатньо тривалими рутинними операціями, автоматизувати які універсальними засобами існуючих САПР на достатньому рівні неможливо. Крім того, передача інформації про деталь у вигляді файлу цифрового креслення не є оптимальною, оскільки втрачається об'єктний зв'язок між елементами креслення. Для 3D-візуалізації ж деталі загальна трудомісткість процесу проектування зазвичай є надмірною.

Аналіз останніх досліджень

Одним із варіантів вирішення даної проблеми є використання параметричних креслень [3], однак такий метод є недостатньо гнучким для уніфікованого застосування у сучасних умовах, вимагає розробки параметричних скріптів і фіксує сугубо певний набір параметрів. Тому при характерній значній трудомісткості, використання параметричних креслень все ж не дозволяє в повній мірі вирішити окреслене коло задач САПР.

Відповідно, хоча побудова цифрових креслень із примітивів за допомогою САПР та використання параметричних креслень виступають класичними способами моделювання об'єктів, через свої характерні переваги все більш перспективним є використання об'єктно-орієнтованого підходу для підвищення ефективності САПР [4]. Тому створення методики й відповідної програмної реалізації об'єктно-орієнтованого редактора цифрових креслень, призначеного для оптимізації процесу створення креслень та 3D-моделей деталей машин засобами сучасних САПР, на сучасному етапі є важливим. Актуальним прикладом сучасної САПР, що призначена для створення цифрових прототипів виробів і деталей та дозволяє створювати й редагувати 3D-моделі деталей машин, є Autodesk Inventor Professional 2016 [5].

Класичними деталями машини, на яких проходять перевірку запропоновані підходи, є вали, зокрема багатоступеневі. Ці фактори визначають актуальність поставленої мети.

Постановка задачі

Метою є дослідження можливості й ефективності застосування об'єктно-орієнтованого підходу до формування 3D-моделей та наборів інженерних креслень (на прикладі валів) шляхом створення спеціалізованого програмного розширення до САПР Autodesk Inventor.

Викладення основних матеріалів дослідження

Об'єктно-орієнтований аналіз є однією з найбільш ефективних і адекватних методологій дослідження й моделювання складних предметних областей, що дозволяє, на відміну від традиційних технологій аналізу та програмування, розробляти всі алгоритми й процедури відповідно до законів математичних абстракцій. Відповідно до поєднання методу типових елементів проектування із властивостями об'єктно-орієнтованого підходу до створення цифрових креслень, деталь у залежності від типової групи розкладається на складові елементи (об'єкти) першого порядку, що включають в себе ряд елементів другого порядку. Елементи другого порядку включають в себе ряд кінцевих властивостей, що розглядаються як елементи третього порядку; для створення складних нетипових деталей або для моделювання процесів складання із елементів першого порядку (деталей) компонується елемент нульового порядку – складна деталь або комплекс (рис. 1).

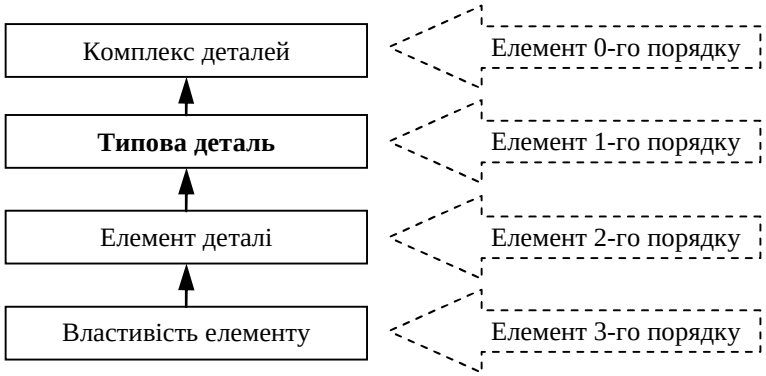


Рис. 1. Ієрархія елементів при об'єктно-орієнтованому підході до створення цифрових креслень

Властивості кожного компонента розділено на геометричні та технологічні (зв'язкові та взаємозв'язкові), причому останні розглядаються як елементи третього порядку. Таким чином, відкривається можливість, з одного боку, методологічного поєднання моделювання монолітних та композитних деталей, з другого боку – інженерної задачі, вирішення якої дозволяє створити інструмент гнучкого вирішення широкого спектру технічних задач. Поєднання методу типових елементів проектування із властивостями об'єктно-орієнтованого підходу до створення цифрових креслень забезпечує методологічну базу для створення високопродуктивного методу роботи з САПР Autodesk Inventor.

Autodesk Inventor є основою технології цифрових прототипів Autodesk [6] й модель, підготовлена в ньому, являє собою точний цифровий 3D-прототип виробу, за допомогою якого можна перевіряти конструкцію в дії паралельно з веденням конструкторських робіт. Це дозволяє значно знизити потребу у виготовленні фізичних дослідних зразків. Застосування цифрових прототипів для конструювання, візуалізації і тестування продукції забезпечує скорочення кількості помилок, ефективний обмін проектною інформацією, швидке виведення інноваційних виробів на ринок. Autodesk Inventor містить великий набір інструментів для промислового 3D-проектування, аналізу виробів, підготовки виробництва й обміну проектними даними, що надає користувачам широкі можливості:

- проектування – об'єднання різних проектних даних в єдиній цифровій моделі;
- візуалізація – створення віртуального представлення виробу для його просування на ринку ще до початку виробництва;
- аналіз – моделювання поведінки виробу в цифровому вигляді.

Створення примітивної моделі починається зі створення ескізу та створення додаткових ескізів на паралельних площинах чи на площині даної моделі й виконання необхідних дій з метою отримання остаточного результату та потрібного вигляду створюваної моделі. Зазвичай для створення моделі в Autodesk Inventor потрібно задати по черзі геометричні розміри та залежності для отримання очікуваного результату.

Практичне застосування запропонованого підходу до поєднання методу типових елементів проектування із властивостями об'єктно-орієнтованого підходу до створення цифрових креслень на прикладі роботи з валами було реалізоване через розробку відповідної інформаційної технології (рис. 2). Для вирішення завдання побудови геометричної й математичної моделі розглядуваного процесу на прикладі об'єктно-орієнтованої формалізації типу деталей, а також методу його чисельного розрахунку, було проведено ієрархічний аналіз елементного розкладу деталі типу «вал».

Рис. 2. Схема інформаційної технології створення об'єктно-орієнтованого редактора креслень

Вал визначається як деталь, що обертається навколо своєї осі, й призначена для передачі руху зв'язаним з нею частинам машини чи механізму, складовою яких вона є. При цьому вал передає крутний момент вздовж своєї осі та забезпечує підтримання обертових деталей машин, котрі на ньому розміщені. Крутні моменти передаються за допомогою сил, що діють на вали з боку механічних передач.

Визначено два типові компоненти першого порядку:

1) циліндр (параметри: довжина, діаметр);

2) паралелепіпед (параметри: довжина, ширина, діаметр).

В складі компонентів першого порядку можуть міститись компоненти другого порядку, наприклад:

1) паз (параметри: довжина, глибина, ширина);

2) канавка (параметри: ширина, глибина);

3) лиска (параметри: довжина, глибина).

Скінченність числа компонентів кожного з порядків, що визначається обмеженнями типу верхнього порядку, забезпечує можливість практичного створення відповідного застосунку [7]. Відповідно до наведеної інформаційної технології об'єктно-орієнтованого підходу до формування 3D-моделей та наборів інженерних креслень у Autodesk Inventor, в розглянутому прикладі з валами вхідними даними є всі необхідні параметри для побудови кожного з елементів кожного з порядків. Вихідними даними є набір інженерних креслень, 3D-модель деталі та зауваження по результатах перевірки вхідних параметрів на взаємоузгодженість.

Програмна реалізація

З метою перевірки ефективності запропонованого підходу та коректності отриманих результатів було створено відповідну тестову систему – спеціалізований об'єктно-орієнтований редактор креслень у вигляді розширення до Autodesk Inventor Professional 2016. Програмний продукт реалізовано на мові C# у середовищі .NET, складається з трьох взаємопов'язаних компонентів (рис. 3) й дозволяє створювати у САПР Autodesk Inventor моделі валів за допомогою вибору вигляду ступенів вала, а також їх геометричних параметрів.

Процес створення валу починається з вибору геометричного вигляду ступенів валу та завдання відповідних геометричних параметрів. Після вибору вигляду ступеня геометричні параметри формуються даними по замовчуванню, які користувач може змінити відповідно до параметрів проектованої деталі (рис. 4).

Після створення валу з обраною кількістю ступенів, при необхідності користувачем визначаються допоміжні елементи на кожному з ступенів валу. Для визначення додаткових елементів ступеня, користувач вибирає через діалогове вікно елементи та позиції цих елементів на ступені валу (рис. 5).

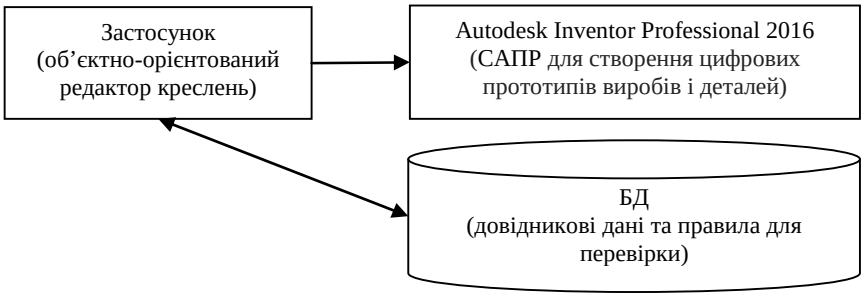


Рис. 3. Архітектура тестової системи

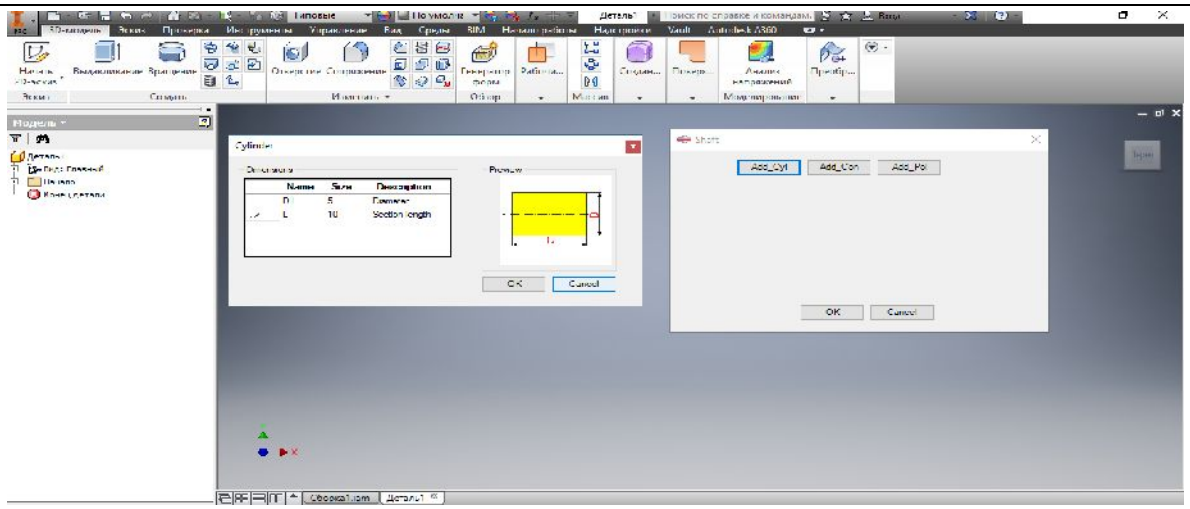


Рис. 4. Приклад формування ступеня валу

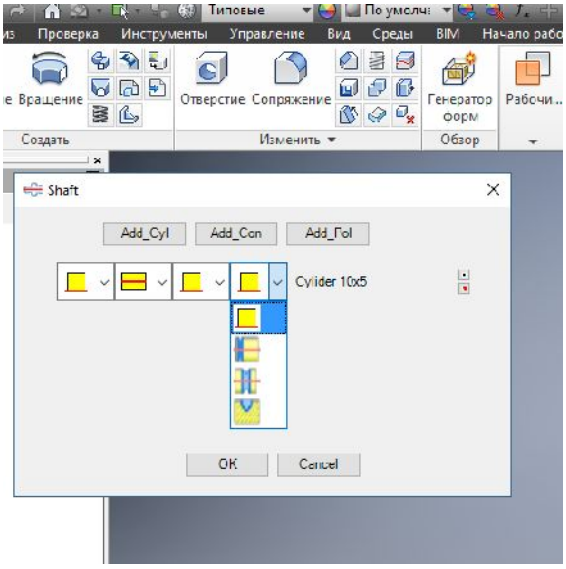


Рис. 5. Створення додаткових елементів ступеня валу

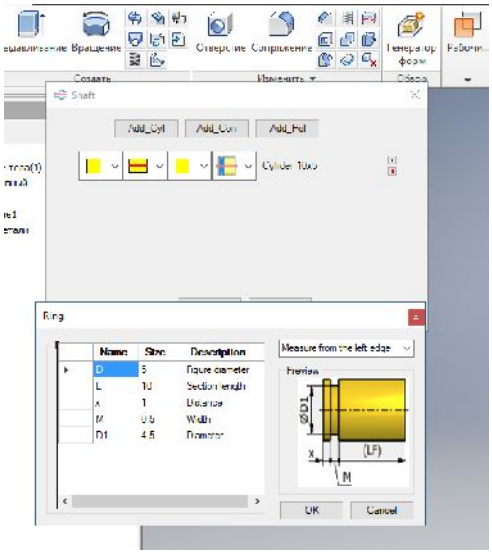


Рис. 6. Вибір параметрів додаткових елементів ступеня валу

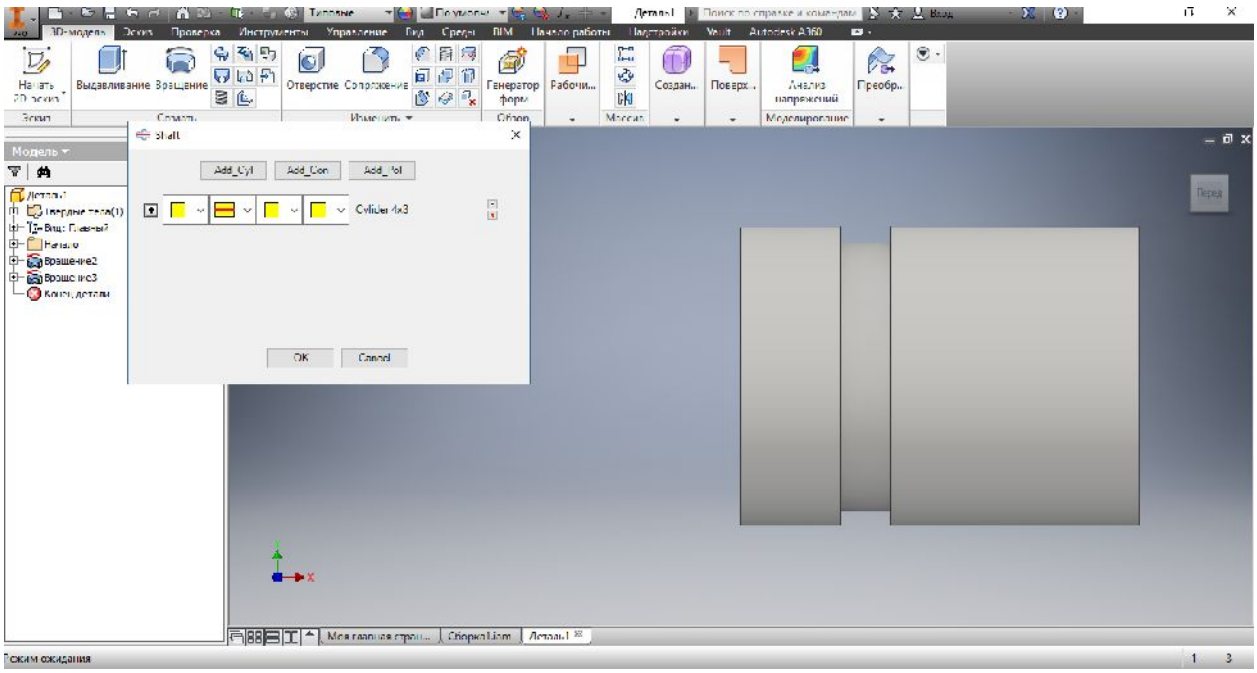


Рис. 7. Сформований ступінь валу

Після вибору додаткового елементу валу з’являється діалогове вікно з автоматично заповненими

запропонованими параметрами цього додаткового елемента, й користувач уточнює їх (рис. 6). У результаті такої обробки всіх додаткових елементів формується відповідний ступінь валу (рис. 7).

В результаті після аналогічної обробки всіх заявлених ступенів валу з перевизначенням їх параметрів формується об’єднана модель валу (рис. 8).

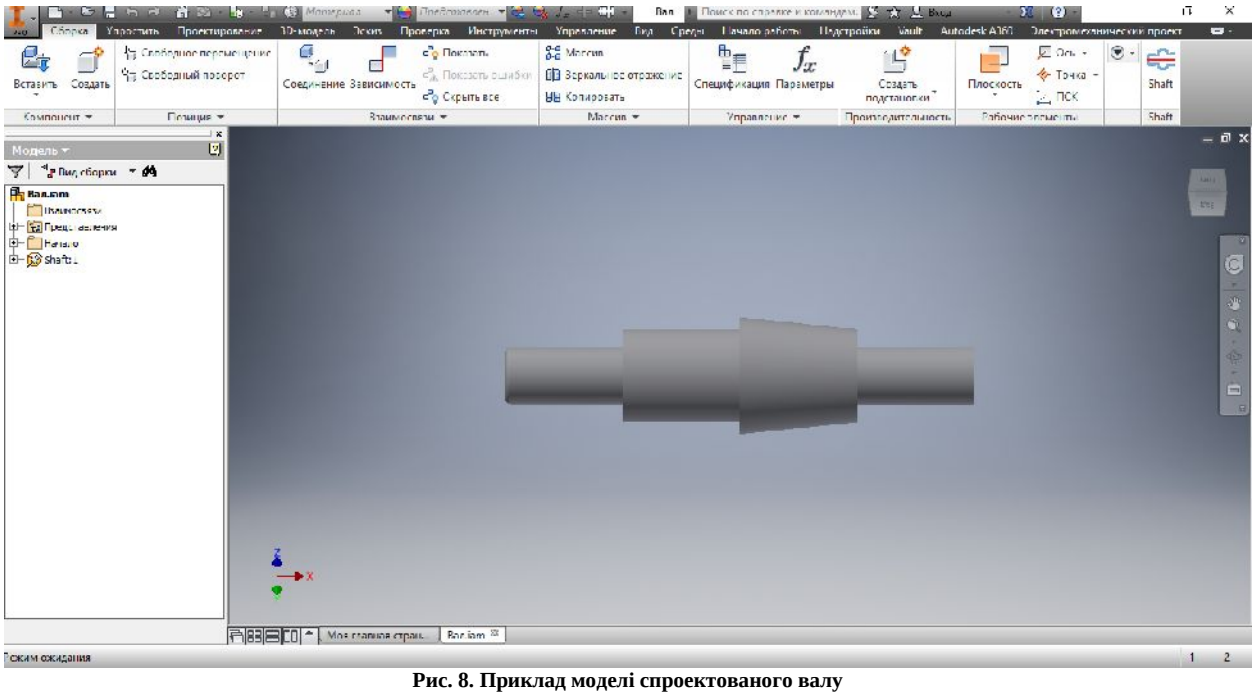


Рис. 8. Приклад моделі спроектованого валу

Так як вибір усіх елементів і робота з параметрами проводиться на стороні розробленого застосунку, а не у власне САПР, то досягається оптимальна швидкодія із збереженням рівня якості результату роботи. В подальшому процес редагування як головних, так і додаткових елементів, можна проводити у будь-який момент часу як з програмного розширення, як і безпосередньо з Autodesk Inventor. За готовою ж моделлю можна отримати набір ескізів для валу (рис. 9).

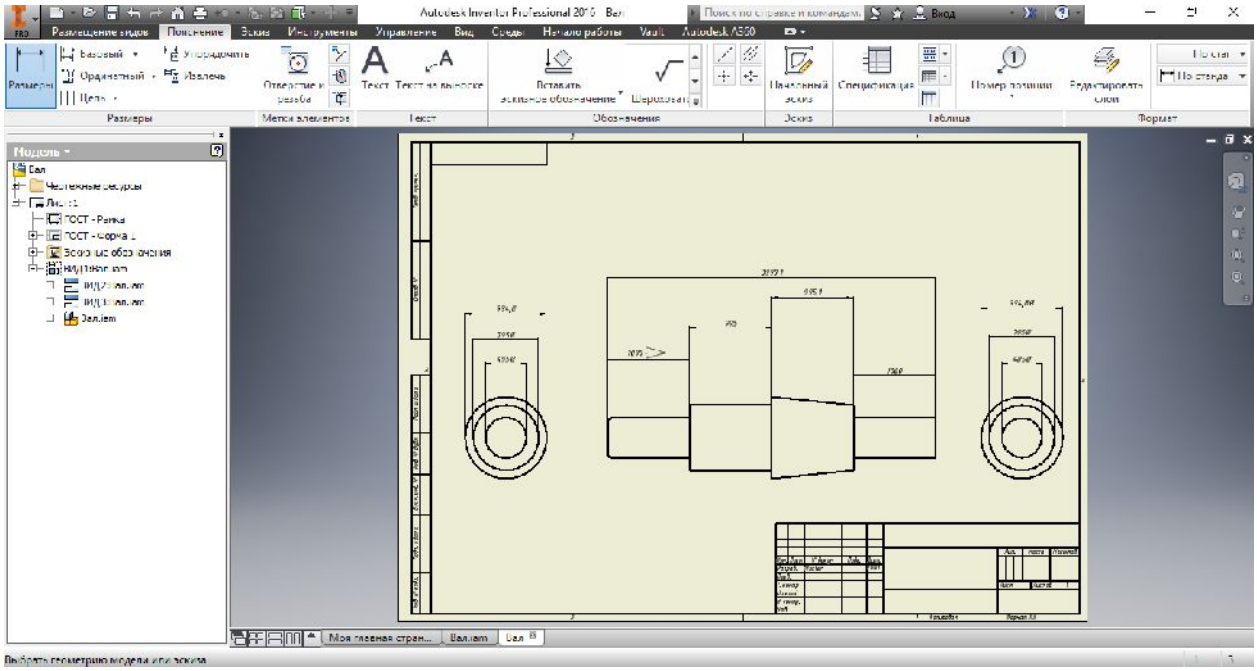


Рис. 9. Сформоване креслення вала

На всіх етапах роботи (як уведенні користувачем даних, так і формуванні елементів моделі) набори параметрів проходить програмну перевірку на помилки, допущені в значеннях розмірів, за допомогою системи правил. При виявлені неточностей або помилок генерується новий рядок у таблицю звіту зі вказівкою, на якому саме етапі виявлена помилка та її зміст. Ефективність роботи підсистеми перевірки визначається якістю і обсягом правил у базі знань. Загалом, при коректно сформованому наборі введених параметрів, запропонований підхід дозволяє більш швидко та наочно одержати набір інженерних креслень й

3D-модель деталі в Autodesk Inventor, ніж стандартні засоби роботи з моделями деталей машин.

Крім переваг у зручності та функціональності, слід відмітити значну економію часу за рахунок автоматизації базових операцій проектувальних робіт й можливість гнучко проводити будь-які зміни конструкції деталі на будь-якому етапі проектування. Також розроблений застосунок може бути використано у навчальних цілях для тренування студентів із метою покращення технічних знань шляхом інтерактивної варіантної генерації комплектації та стандартних розмірів деталей машин.

Висновки

У статті було досліджено можливості й ефективність застосування об'єктно-орієнтованого підходу до формування 3D-моделей та наборів інженерних креслень (на прикладі валів) шляхом створення спеціалізованого програмного розширення до САПР Autodesk Inventor. Викладено спосіб поєднання технології типових елементів проектування із властивостями об'єктно-орієнтованого підходу до створення цифрових креслень. Було розглянуто інформаційну технологію й відповідну програмну реалізацію даного методу – об'єктно-орієнтований редактор креслень, що дозволяє інтерактивно формувати образ деталі шляхом вибору складових образу деталі та їх параметрів і забезпечує взаємодію з САПР Autodesk Inventor для одержання набору інженерних креслень та 3D-моделі валу.

Література

1. Проблеми автоматизації САПР [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://moodle.chdu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=67690

2. Мазурець О. В. Комплексний підхід до створення системи конструкторської та технологічної підготовки виробництва / О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами третьої всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2009». – Хмельницький : ХНУ, 2009. – С. 110–115.

3. Принципи параметричного проектування [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://helpiks.org/3-87944.html

4. Смолій О. Ю. Особливості розробки об'єктно-орієнтованого редактора цифрових креслень деталей машин / О. Ю. Смолій, О. В. Мазурець // Актуальні проблеми комп'ютерних технологій : збірник наукових праць за матеріалами четвертої всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2010». – Хмельницький : ХНУ, 2010. – Т. 2. – С. 95–103.

5. Autodesk Inventor Professional 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.autodesk.ru/products/inventor/overview

6. Autodesk [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/Autodesk

7. Ковальчук С. С. Програмна реалізація об'єктно-орієнтованого редактора цифрових креслень деталей машин / С. С. Ковальчук, О. В. Мазурець, О. Ю. Смолій // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнародний науково-технічний журнал. – Хмельницький, 2009. – № 1 (33). – С. 148–152.

References

1. Problemi avtomatizacії SAPR [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://moodle.chdu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=67690

2. Mazurec' O. V. Kompleksnij pidhid do stvorennja sistemi konstruktors'koї ta tehnologichnoї pidgotovki virobnictva / O. V. Mazurec' // Zbirnik naukovih prac' za materialami tret'oї vseukraïns'koї naukovo-tehnichnoї konferencії «Aktual'ni problemi komp'juternih tehnologij 2009». – Hmel'nic'kij : HNU, 2009. – C. 110–115.

3. Principi parametrichnogo proektuvannja [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://helpiks.org/3-87944.html

4. Smolij O. Ju. Osoblivosti rozrobki ob'єktno-orієntovanogo redaktora cifrovih kreslen' detalej mashin / O. Ju. Smolij, O. V. Mazurec' // Aktual'ni problemi komp'juternih tehnologij : zbirnik naukovih prac' za materialami chetvertoї vseukraïns'koї naukovo-tehnichnoї konferencії «Aktual'ni problemi komp'juternih tehnologij 2010». – Hmel'nic'kij : HNU, 2010. – T. 2. – S. 95–103.

5. Autodesk Inventor Professional 2016 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://www.autodesk.ru/products/inventor/overview

6. Autodesk [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : https://uk.wikipedia.org/wiki/Autodesk

7. Koval'chuk S. S. Programna realizacija ob'єktno-orієntovanogo redaktora cifrovih kreslen' detalej mashin / S. S. Koval'chuk, O. V. Mazurec', O. Ju. Smolij // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah : mizhnarodnij naukovo-tehnichnij zhurnal. – Hmel'nic'kij, 2009. – № 1 (33). – C. 148–152.

Рецензія/Peer review : 17.09.2017 р. Надрукована/Printed :30.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 621.311.62.19

О.Є. РУБАНЕНКО, М.О. ГРИЩУК
Вінницький національний технічний університет
М.П. ЛАБЗУН
ДП НЕК «Укренерго» Південно-Західна електроенергетична система

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕЖ ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ АЧХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ВІДПОВІДНОГО ДЕФЕКТАМ ЗСУВУ ВИТКІВ

В статті проаналізовано існуючі методи та засоби визначення технічного стану обмоток силових трансформаторів (СТ) та доведена можливість використання методу контрольних меж для визначення меж діапазону частот, в якому проявляється дефект зсуву витків обмотки за результатами аналізу амплітудно-частотних характеристик, що може бути використано під час контролю стану обмоток СТ.

Ключові слова: діагностування, пошкодження, силовий трансформатор, частотний аналіз, обмотки.

A.E. RUBANENKO, M.A. GRISHCHUK
Vinnitsa National Technical University
M.H. LABZUN
NEC «Ukrenergo» South-Western Electricity System

BREAKDOWN OF THE RANGE OF THE FREQUENCY RANGE OF FREQUENCY OF TRANSFORMERS IN RELEVANT DEFECTS OF CURRENT STATUS

The article analyzes the existing methods and means for determining the technical state of winding power transformers and proves the possibility of using the control limit method to determine the limits of the frequency range in which the deflection of the winding turns is detected by the results of the analysis of the amplitude-frequency characteristics that can be used during the control I will become winding. In modern power systems, the power transformer is one of the main types of high-voltage equipment. Failure of the power transformer during operation significantly impairs the reliability parameters and economic performance of the power plant. The growing number of outdated transformers during their operation reduces reliability and increases the likelihood of failure; therefore, a reliable diagnostic tool is needed to determine the current technical state and the remaining power equipment resource. Frequency response analysis (FRA) is a powerful diagnostic method for detecting the deformation of the winding and damage to the magnetic circuit, even at an early stage in their development. Although this method of test control of power transformers is relatively simple since the creation of the FRA special equipment, the interpretation of the results remains highly specialized and requires qualified personnel and proper technical documentation to determine the type and location of damage. The purpose of the research is to improve the quality of the diagnosis of power transformers. Research objectives: analysis existing methods and means for determining the technical state of winding power transformers; to prove the possibility of using the method of control limits in order to substantiate conclusions about the state of windings by the results of the analysis of their amplitude-frequency characteristics.

Keywords: diagnostics, damage, power transformer, frequency analysis, winding.

Вступ. В сучасних електроенергетичних системах (ЕЕС) СТ є одним з основних видів високовольтного обладнання. Вихід з ладу СТ під час експлуатації значно погіршує параметри надійності та економічні показники роботи енергетичного підприємства. Пошкодження СТ під час їх експлуатації в ЕЕС [1, 2] зменшує надійність та збільшує ймовірність відмови іншого обладнання, тому потрібен надійний інструмент діагностування. Зростаюча кількість застарілих трансформаторів під час їх експлуатації в ЕЕС зменшує надійність та збільшує ймовірність відмови, тому для визначення поточного технічного стану та залишкового ресурсу силового обладнання потрібен надійний інструмент діагностування.

Електродинамічні сили, які діють на обмотки СТ під час перехідних процесів в ЕЕС, наприклад, під час коротких замкнень на шинах або поблизу електричних підстанцій, за певних умов викликають деформацію обмоток. Однією з причин того, що трансформатор зазнає механічних пошкоджень обмоток, є зміна сили затиску витків. При незначних деформаціях обмотки трансформатор продовжує працювати. Однак, його здатність витримувати перевантаження зменшується. Деформація обмоток може мати багато форм, включаючи радіальне та осьові зсуви, вигинання провідника, затягування спіралі та пошкодження опори обмотки. Цей тип внутрішніх несправностей важко виявити за допомогою традиційних методів діагностування [3]. Аналіз частотних характеристик СТ (FRA) – це потужний діагностичний метод для виявлення деформації обмотки та пошкоджень магнітопроводу [4, 5], навіть на ранній стадії їх розвитку.

Хоча цей метод тестового контролю СТ є відносно простим з моменту створення спеціального обладнання FRA, інтерпретація результатів залишається вузькоспеціалізованою та потребує кваліфікованого персоналу та належної технічної документації, для визначення виду та можливого розташування пошкодження [6].

Метою досліджень є підвищення якості діагностування силових трансформаторів.

Задачі досліджень: аналіз існуючих методів та засобів визначення технічного стану обмоток силових трансформаторів (СТ); доведення можливості використання методу контрольних меж з метою обґрунтування висновків про стан обмоток СТ за результатами аналізу їх амплітудно-частотних характеристик (АЧХ).

Результати досліджень. Методи та засоби діагностування СТ ґрунтуються на результатах вимірювання діагностичних параметрів і передбачають їх накопичення, зберігання та обробку з метою визначення технічного стану, причин та місця пошкодження. Для визначення стану СТ (справний – несправний; роботоздатний – нероботоздатний і т. п.) порівнюють виміряне значення діагностичного параметра з його нормованим значенням, або з нормованим відхиленням від результатів попередніх вимірів.

Так, наприклад, опір обмоток постійному струму, в процесі експлуатації, не повинний істотно змінюватися. Виміряне значення опору не повинно відрізнятися більш ніж на 2% від результатів заводських

і/або попередніх випробувань [6]. Вимірювання проводяться на всіх відгалуженнях кожної фази. Значення опору на одних і тих самих відгалуженнях різних фаз також не повинні відрізнятися один від іншого, якщо немає особливих застережень у паспорті трансформатора.

Опори обмоток силових трансформаторів – невеликі. Вони вимірюються вимірювальними мостами [6], або методом падіння напруги (метод також називають методом вольтметра-амперметра).

Контроль параметрів холостого ходу дозволяє визначити дефекти обмотки і магнітопроводу на підприємстві-виробнику, а також, за [6], під час проведення капітального ремонту, пов'язаного з необхідністю перешихтування осердя, або його верхнього ярма, застосовують контроль параметрів холостого ходу при напрузі, яка дорівнює номінальній, або при меншій за номінальну напругу.

Згідно [6] вимірюють напругу короткого замикання (Uк,%) для діагностування трансформатора, яка характеризує стан обмоток. Під час протікання струмів короткого замикання (КЗ), на обмотки трансформатора діють електродинамічні сили. Під їх впливом можуть виникнути деформації обмоток.

Під час таких деформацій, особливо радіальних, змінюється розташування та відстань витків, між собою, а також відносно магнітопроводу. Як наслідок, відбувається зміна напрямків магнітних потоків розсіювання, що призводить до зміни індуктивного опору короткого замикання (Хк), а отже, і повного опору Zк (у потужних трансформаторах Zк ≈ Хк).

В деяких випадках, під час контролю механічного стану обмоток успішно поєднують метод контролю Zк з методом низьковольтних імпульсів, який дозволяє виявляти дефекти обмоток на ранній стадії їх розвитку.

З метою визначення технічного стану магнітопроводу контролюють струм або потужність холостого ходу СТ, або, наприклад, вимірюють магнітних властивості осердя методом Стілуса, який базується на вимірюванні локального магнітного потоку в магнітопроводі трансформатора. Однак такий метод вимагає свердління отворів у листі шихтованої сталі. Новоутворений простір між листами впливає на розподіл магнітного потоку.

Відомий метод вимірювання місцевих втрат в сталі за допомогою термографії, який базується на місцевому магнітному вимірюванні втрат в сталі за допомогою методики Стілус-зонда. Також вимірюють інтенсивність та щільність магнітного потоку [7, 8].

Проте, поблизу спільних частин, де сталеві листи перекриваються, виникає похибка вимірювання щільності магнітного потоку. Тому для аналізу втрат в сталі, потрібно вдосконалювати методи вимірювань та контролю стану магнітопроводу.

Наприклад відомий метод розрахунку втрат в сталі з використанням значень підвищення температури листа сталі осердя. Зокрема, контролюють температуру за допомогою інфрачервоної термографії. Це дозволяє одночасно контролювати розподіл тепла на більшій поверхню магнітопроводу, в порівнянні з методами, що використовують термопари або терморезисторні термометри.

Відомо, що осердя є джерелом акустичного шуму, викликаного електромагнітними коливаннями на стиках листів шихтованої сталі. Відповідно, для аналізу його стану використовують метод трьох вимірного контролю вібрації в різних точках осердя трансформатора.

Однак, аналіз пошкоджуваності СТ свідчить про те, що незважаючи на велику кількість методів та засобів діагностування мають місце пошкодження як нових СТ, так і тих, які експлуатуються понад 25 років, що перевищує їх паспортний ресурс. Отже потрібно вдосконалювати методи та засоби діагностування СТ з метою виявлення пошкоджень на ранній стадії їх розвитку.

Результати досліджень пошкоджень вузлів та деталей СТ свідчать про те, що, як в Україні, так за кордоном (табл. 1), чимало з них припадає на пошкодження обмоток та магнітопроводів [1, 2, 9].

Це доводить необхідність врахування стану цих елементів трансформатора під час його експлуатації.

Таблиця 1

Розподіл вузлів трансформатора за їх пошкодженнями

Пошкодження	В Україні	В Німеччині
Бак	7,6 %	3,6 %
РПН	9,5 %	33,9 %
Обмотка	9,7 %	32,1 %
Магнітопровід	5,4 %	7,1 %
Система охолодження	23,1 %	0,9 %
Вводи	15,6 %	11,6 %
Ізоляція	29,1 %	9,8 %

Наприклад, виправданим є використання передатної функція тестового сигналу змінюваної в часі частоти; залежності залишкового опору тестового сигналу від частоти; відхилення початкового графіку залежності значення передатної функції тестового сигналу, від частоти для поточних та передостанніх вимірювань.

Обґрунтування інформативного діапазону частот в якому проявляються дефекти обмотки СТ. Пропонуємо обґрунтовувати межі інформативного діапазону частот АЧХ СТ для виявлення дефекту зсуву витків обмотки СТ, шляхом аналізу АЧХ однотипних трансформаторів з використанням методу контрольних меж [10÷13].

З метою визначення найбільш інформативних меж частот в яких виявляються зсуви обмоток за допомогою FRAnalayzer здійснено обстеження *16* одиниць трансформаторів ТМ – 6300/35/10, які мають

пошкодження у вигляді деформації обмоток. В якості вимірювального приладу використовуємо FRAnalayzer виробництва фірми Omicron.

Запишемо до таблиці 2 мінімальних значень частот *f* діапазону АЧХ несправних трансформаторів, в якому відхилення передатної функції досліджуваного пошкодженого трансформатора відрізняється від значень передатної функції однотипного справного СТ на понад 1%.

В таблиці 1 показані результати вимірів для 16 однотипних трансформаторів з зсувами обмоток. Для кожного трансформатора для усунення впливу завад розташування трансформаторів, для усунення похибок персоналу вимірювання параметрів кожного трансформатора повторювалось по п'ять разів. Незважаючи на те, що вигляд графіків залежностей майже не змінювався та підтверджував висновки, зроблені за результатами вимірювань напруги та опору короткого замикання – все одно мали місце незначні відхилення граничних значень меж діапазону в якому проявлявся дефект зсувів обмоток.

Таблиця 2

Мінімальні граничні значення меж залежностей значень передатної функції від частоти

Номер вимірювання	Граничні значення меж залежностей значень передатної функції від частоти, Гц															
	Номер трансформатора															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	42513	42655	46077	42185	43945	42115	44474	43428	43182	43359	45303	43520	43403	45579	45200	41894
2	45853	46082	45681	43596	43837	45021	44809	41803	45891	44395	43546	43954	44674	43304	44364	45890
3	45765	42550	43471	42528	43576	46103	42421	42103	43406	44062	43530	43663	43585	42225	43537	41937
4	43665	42457	42478	44064	43653	45938	42295	42309	43810	43653	45102	44545	45229	45187	41957	42819
5	45597	45987	43516	42909	42613	43348	44902	43626	44550	45985	45601	45487	43176	45183	41982	45801

Отже кожен трансформатор досліджувався 5 разів – n = 5. Кількість трансформаторів m = 16. Загальна кількість вимірів $n_0=n\cdot m$ = 80. Для кожного трансформатора визначаємо середнє значення з п'яти виміряних значень одного того самого трансформатора.

Знаходимо суму результатів вимірів для кожного трансформатора, наприклад для першого трансформатора:

$$\sum_{i=1}^{5} f_i = 42513+45853+45765+43665+45597 = 223393, \text{ Гц.} \quad (1)$$

Знаходимо середнє значення результатів вимірів для першого трансформатора

$$F_{середнє} = \bar{f}_1 = \frac{1}{5}\times 223393 = 44678{,}6 \text{ , Гц.} \quad (2)$$

З результатів вимірів для першого трансформатора вибираємо максимальний $F_{1\ макс.}$ та мінімальний результати $F_{i\ мін.}$

$F_{1\ макс.}$ = 45853, Гц;

$F_{1\ мін.}$ = 42513, Гц.

Знаходимо максимальний розмах результатів вимірів для першого трансформатора

$$R_1 = F_{1\ макс.} - F_{1\ мін.} = 45853 - 42513 = 3340, \text{ Гц.} \quad (3)$$

Порахуємо оцінки (для кількості вимірів $m=n_0/n=16\cdot 5/5=80/5=16$ вимірів, для загальної кількості виміряних трансформаторів $n_0=16\cdot 5=80$ вимірів; для кількості вимірів для 1 трансформатора n=5 вимірів)

$$\hat{f}_0 = \bar{\bar{f}} = \frac{1}{16}\cdot\sum_{g=1}^{16}\bar{y}_g = (44679+43946+44245+43056+$$

$$+43525+44505+43780+42654+44168+44291+$$

$$+44616+44234+44013+44296+43408+43668)/16=43942{,}73, \text{ Гц;}$$

$$\hat{R} = \bar{R} = \frac{1}{16}\sum_{g=1}^{16} R_g = (3340+3625+1879+1332+3988+2607+1823+$$

$$+2709+2626+2071+1967+2053+3354+3243+3996+3599)/16=2763{,}25, \text{Гц};$$

Середньоквадратичне відхилення

$$\hat{\sigma} = \frac{\hat{R}}{d} = \frac{2763{,}25}{2{,}33} = 1185{,}95, \text{ Гц.} \quad (4)$$

де d =2,33 [14] з врахуванням того, що n = 5).

Перевіримо $\hat{\sigma}$ більш точним методом

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n_0 - 1}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{80-1}\times 102459627{,}8} = \sqrt{1296957} = 1138{,}8, \text{ Гц.} \quad (5)$$

Похибка при спрощеному визначенні $\hat{\sigma}$ не перевищує

$$\left|\frac{1138{,}8-1185{,}95}{1138{,}8}\right| \times 100\% = 4{,}136\%. \quad (6)$$

Розраховуємо нижню контрольну межу (за умови двосторонніх меж) для середніх значень за умови, що рівень значимості α_1=0,0027, а довірча імовірність p_1=1 – α_1 = 1– 0,0027 = 0,9973

$$F_{н\bar{y}} = \bar{f_0} - U_{\left(\frac{1+p_1}{2}\right)} \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n_0}} = 43942{,}73 - U_{\left(\frac{1+1-0{,}0027}{2}\right)} \cdot \frac{1185{,}95}{\sqrt{80}} = 43921, \text{ Гц.} \quad (7)$$

Квантіль нормального закону розподілу

$$U_{\left(\frac{1+p_1}{2}\right)} = U_{\left(\frac{1+1-0{,}0027}{2}\right)} = 3{,}0024 \approx 3. \quad (8)$$

Верхня межа діапазону прояву дефекту зсуву витків обмотки.

Граничні значення меж на графіках залежностей передатної функції від частоти для трансформаторів з обмотками, що мали осьові зсуви приведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Граничні максимальні значення меж залежностей значень передатної функції від частоти

Номер вимірювання	Граничні значення меж залежностей значень передатної функції від частоти, Гц															
	Номер трансформатора															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	408870	382845	388668	406804	378023	402231	390236	406636	381545	399185	395566	384495	392317	406189	405989	400015
2	385136	383867	387915	406888	389963	393251	402400	407873	380674	391585	401667	407030	399537	391779	386798	385609
3	391751	397915	391030	402974	379605	397606	386074	385848	385527	379781	394529	398236	383595	384254	381555	392785
4	404945	381858	390303	378585	397578	394293	394703	379614	401676	387020	391074	397167	405355	381800	398512	408964
5	404339	398029	382228	390210	406110	401525	380276	390778	394594	403408	401025	379859	395855	389927	397702	376629

Сума результатів вимірів для кожного трансформатора, наприклад для першого трансформатора:

$$\sum_{i=1}^{5} f_i = 408870+385136+391751+404945+404339 = 1995041, \text{ Гц.}$$

Середнє значення результатів вимірів для першого трансформатора

$$F_{середнє} = \overline{f_1} = \frac{1}{5} \cdot 1995041 = 399008{,}2, \text{ Гц.}$$

З результатів вимірів максимального значення межі передатної функції для першого трансформатора вибираємо максимальне $F_{1\ макс.}$ та мінімальне значення $F_{i\ мін.}$

$F_{1\ макс.}$ = 408870 Гц;

$F_{1\ мін.}$ = 385136 Гц.

Знаходимо максимальний розмах результатів вимірів для першого трансформатора

$R_1 = F_{1\ макс.} - F_{1\ мін.}$ = 408870 – 385136 = 23734 Гц.

Порахуємо оцінки (для кількості вимірів $m=n_0/n=16\cdot5/5=80/5=16$ вимірів, для загальної кількості виміряних трансформаторів $n_0=16\cdot5=80$ вимірів; для кількості вимірів для 1 трансформатора $n=5$ вимірів)

$$\hat{f}_0 = \overline{\overline{f}} = \frac{1}{16} \cdot \sum_{g=1}^{16} \overline{y}_g = (399008 + 388903 + 388029 + 397092 +$$

$$+390255 + 397781 + 390737 + 394150 + 388803 + 392196 +$$

$$+396772 + 393357 + 395332 + 390790 + 39411 + 392800) / 16 = 393132, \text{ Гц;}$$

$$\hat{R} = \overline{\overline{R}} = \frac{1}{16} \sum_{g=1}^{16} R_g = (23734 + 16171 + 8802 + 28303 + 28087 + 8980 +$$

$$+22124 + 28259 + 21002 + 23627 + 10593 + 27171 + 21760 + 24389 +$$

$$+24434 + 32335) / 16 = 21860{,}68 \text{ Гц;}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\hat{R}}{d} = \frac{21860{,}68}{2{,}33} = 9382{,}27, \text{ Гц.}$$

Перевіримо $\hat{\sigma}$ більш точним методом

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n_0 - 1} \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \overline{y}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{80 - 1} \cdot 5575579674} = \sqrt{70576958} = 8401, \text{ Гц.}$$

Похибка при спрощеному визначенні $\hat{\sigma}$ не перевищує

$$\left| \frac{8401 - 9382{,}27}{8401} \right| \cdot 100\% = 11{,}68\%.$$

Розраховуємо верхню контрольну межу (за умови двосторонніх меж) для середніх значень за умови, що рівень значимості α_1=0,0027, а довірча імовірність $p_1 = 1 - \alpha_1 = 1 - 0{,}0027 = 0{,}9973$

$$F_{в,\overline{f}} = \overline{f_0} - U\left(\frac{1+p_1}{2}\right) \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n_0}} = 393132 - U\left(\frac{1+1-0{,}0027}{2}\right) \cdot \frac{9382{,}27}{\sqrt{80}} = 393289{,}9, \text{ Гц.}$$

Отже, за таким алгоритмом можна визначити верхню та нижню межу діапазону частот, в яких виявляються дефекти радіального зсуву обмоток трансформатора.

Висновки

Незважаючи на велику кількість існуючих методів та засобів визначення технічного стану обмоток силових трансформаторів мають місце їх пошкодження. Використання методу контрольних меж дозволяє визначити межі діапазону частот в якому проявляється дефект зсуву витків обмотки на за результатами аналізу амплітудно-частотних характеристик, що може використано під час контролю стану обмоток СТ.

Література

1. Рубаненко, О. Є. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів / О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. О. Грищук // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 23 (1245). – С. 41–46. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07.

2. Tenbohlen S., Vahidi F., Müller P., Gebauer J., Krüger M. Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungstransformatoren (em inglês), Proc. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2012. pp. 61–70.

3. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами ЕЕС з урахуванням технічного стану трансформаторів із РПН / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. І. Казьмірук // Наукові праці ВНТУ. –

2012. – № 4. – 9 с.

4. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій : монографія / О. О. Матусевич ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295, [1] с. : рис., табл. – ISBN 978-966-8471-55-1

5. Галузевий керівний документ. Норми випробовування електрообладнання : затверджено і введено в дію наказом Міністерства палива та енергетики України № 13 від 15 січня 2007 р. / ДП «ДонОРГРЕС», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС» ; розробники : Г. Шкуринський, В. Бочаров, В. Сприса. – К. : Державний стандарт України, 2007. – 262 с.

6. Wang, S. Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic–Structural Coupling Model / S. Wang et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – Т. 26. – №. 7. – С. 1–5. – doi: 10.1109/TASC.2016.2584984.

7. Zhang Z. W. Experimental investigation of localized axial winding displacement in a high frequency range for power transformers / Z. W. Zhang et al. // Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), International Conference on IEEE. – 2016. – P. 388–391. – doi: 10.1109/CMD.2016.7757841.

8. FLORKOWSKI, Marek; FURGAŁ, Jakub. Detection of transformer winding deformations based on the transfer function-measurements and simulations. *Measurement science and technology*, 2003, 14.11: 1986.

9. BEHJAT, Vahid; MAHVI, Mojtaba; RAHIMPOUR, Ebrahim. New statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: non-parametric statistical methods. *IET Science, Measurement & Technology*, 2016, 10.4: 364–369.

10. GONZALES, J. C.; MOMBELLO, E. E. Fault interpretation algorithm using frequency-response analysis of power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31.3: 1034–1042. **DOI:** 10.1109 / TPWRD.2015.2448524

11. RAHIMPOUR, Hossein; MITCHELL, Steve; RAHIMPOUR, Saeed. Online monitoring of power transformers using impulse frequency response analysis. In: *Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on*. IEEE, 2017. p. 1390–1394. **DOI:** 10.1109 / IranCEE.2017.7985259

12. ALSUHAIBANI, Saleh, et al. A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics. *Energies*, 2016, 9.11: 879.

13. Лежнюк П.Д. Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, Ю В. Лук'яненко. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 167 с.

14. Круг Г.К. Теоретические основы планирования экспериментальных исследований / Круг Г.К. – М. : Изд-во МЭИ, 1974. – 185 с.

References

1. Rubanenko, O. Є. Viznachennja defektiv transformatornogo obladnannja z vikoristannjam chastotnih diagnostichnih parametriv / O. Є. Rubanenko, M. P. Labzun, M. O. Grishhuk // Visnik NTU «HPI», Serija: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. – Harkiv : NTU «HPI». – 2017. – № 23 (1245). – S. 41–46. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.07.

2. Tenbohlen S., Vahidi F., Müller P., Gebauer J., Krüger M. Zuverlässigkeitsbewertung von Leistungstransformatoren (em inglês), Proc. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2012. pp. 61–70.

3. Lezhnjuk P. D. Optimal'ne keruvannja normal'nimi rezhimami EES z urahuvannjam tehnichnogo stanu transformatoriv iz RPN / P. D. Lezhnjuk, O. Є. Rubanenko, O. I. Kaz'miruk // Naukovi praci VNTU. – 2012. – № 4. – 9 s.

4. Udoskonalennja metodologiї sistemi tehnichnogo obslugovuvannja i remontu tjagovih pidstancij : monografija / O. O. Matusevich ; Dnipropetr. nac. un-t zalizn. transp. im. V. Lazarjana. – Dnipropetrovs'k : Dnipropetr. nac. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazarjana, 2015. – 295, [1] s. : ris., tabl. – ISBN 978-966-8471-55-1

5. Galuzevij kerivnij dokument. Normi viprobovuvannja elektroobladnannja : zatverdzheno i vvedeno v diju nakazom Ministerstva paliva ta energetiki Ukraïni № 13 vid 15 sichnja 2007 r. / DP «DonORGRES», VAT «L'vivORGRES» ; rozrobniki : G. Shkurins'kij, V. Bocharov, V. Sprisa. – K. : Derzhavnij standart Ukraïni, 2007. – 262 s.

6. Wang, S. Cumulative Deformation Analysis for Transformer Winding Under Short-Circuit Fault Using Magnetic–Structural Coupling Model / S. Wang et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – T. 26. – №. 7. – S. 1–5. – doi: 10.1109/TASC.2016.2584984.

7. Zhang Z. W. Experimental investigation of localized axial winding displacement in a high frequency range for power transformers / Z. W. Zhang et al. // Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), International Conference on IEEE. – 2016. – P. 388–391. – doi: 10.1109/CMD.2016.7757841.

8. FLORKOWSKI, Marek; FURGAŁ, Jakub. Detection of transformer winding deformations based on the transfer function-measurements and simulations. Measurement science and technology, 2003, 14.11: 1986.

9. BEHJAT, Vahid; MAHVI, Mojtaba; RAHIMPOUR, Ebrahim. New statistical approach to interpret power transformer frequency response analysis: non-parametric statistical methods. IET Science, Measurement & Technology, 2016, 10.4: 364–369.

10. GONZALES, J. C.; MOMBELLO, E. E. Fault interpretation algorithm using frequency-response analysis of power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31.3: 1034–1042. DOI: 10.1109 / TPWRD.2015.2448524

11. RAHIMPOUR, Hossein; MITCHELL, Steve; RAHIMPOUR, Saeed. Online monitoring of power transformers using impulse frequency response analysis. In: Electrical Engineering (ICEE), 2017 Iranian Conference on. IEEE, 2017. p. 1390–1394. DOI: 10.1109 / IranCEE.2017.7985259

12. ALSUHAIBANI, Saleh, et al. A Review of Frequency Response Analysis Methods for Power Transformer Diagnostics. Energies, 2016, 9.11: 879.

13. Lezhnjuk P.D. Osnovi teoriї planuvannja eksperimentu. Laboratornij praktikum / P.D. Lezhnjuk, O.Є. Rubanenko, Ju V. Luk'janenko. Vinnicja : VNTU, 2005. 167 s.

14. Krug G.K. Teoreticheskie osnovy planirovanija jeksperimental'nyh issledovanij / Krug G.K. – M. : Izd-vo MJeI, 1974. 185 s.

Рецензія/Peer review : 08.09.2017 р. Надрукована/Printed :29.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 004.773.2

О.Р. ТРАЧ
Національний університет «Львівська політехніка»

КРИТИЧНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ ЗАВДАНЬ НАПРЯМІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВІРТУАЛЬНОЇ СПІЛЬНОТИ

В статті описано ключові фактори процесу організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Виділено типи показників для завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Визначений поділ критичності показників для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти на критичні, некритичні та важливі. Розроблено алгоритми визначення критичних, некритичних та важливих показників для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти.

Ключові слова: *віртуальні спільноти, життєвий цикл, показники завдань, напрями.*

O. TRACH
Lviv Polytechnic National University

CRITICALITY OF INDICATORS OF TASKS OF DIRECTIONS OF THE VIRTUAL COMMUNITY LIFE CYCLE ORGANIZATION

The article describes key factors in the process of the organization of life cycle of virtual community. The lifecycle model defines the steps and directions that ensure the creation and continuous management of the virtual community. The types of indicators for the tasks of the organization of life cycle of virtual community are identified. Dedicated indicators of user, information and reputation directions of the organization of life cycle of virtual community. Resource direction is processed without indicators, using technical and technological data. The division of indicators into: input and output indicators determine planned, introduced using a benchmark and indicator based on analysis, real. The breakdown of the criticality of the indicators for the tasks of the virtual community life cycle organization is defined: critical, uncritical and important. Determining the criticality of the indicators of the goals of organizing the life cycle of the virtual community is necessary. It is necessary for the rapid and qualitative implementation of the tasks in accordance with the purpose and purpose of creating the virtual community. The algorithms for determining the critical, noncritical and important indicators for the implementation of tasks of the virtual community life cycle organization are developed. The result of the algorithm is the determination of the criticality of indicators, the uncriticality of indicators and important indicators, the rejection of inappropriate indicators and the task of directing of the organization of life cycle of virtual community.

Keywords: *virtual community, life cycle, indicators of tasks, directions.*

Вступ

Комплекс робіт, пов'язаний з проектною діяльністю віртуальної спільноти, має багато особливостей. Формалізація життєвого циклу віртуальної спільноти забезпечує якісніший підхід до процесів планування, аналізу, розробки та управління віртуальною спільнотою. Модель життєвого циклу визначає етапи та напрями [1], які забезпечують створення та безперервне управління віртуальною спільнотою. В організації життєвого циклу віртуальної спільноти виділяють наступні напрями: користувацький, інформаційний, репутаційний та ресурсний.

Для ефективного виконання етапів життєвого циклу віртуальної спільноти, згідно з організаційно-управлінським алгоритмом організації життєвого циклу віртуальної спільноти [2], відбувається виконання завдань напрямів. Для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти введено показники, елементи якого носять кількісний характер. Ресурсний напрям опрацьовується без показників, використовуючи технічні та технологічні дані.

Процес організації життєвого циклу віртуальної спільноти має розподілений характер, окремі складові якого виконують [3] менеджер (це спеціаліст, який відповідає за успішність організації життєвого циклу віртуальної спільноти), аналітик (спеціаліст, який відповідає за аналіз предметної області та аналіз еталонних спільнот), виконавці етапів (спеціаліст, який відповідає за хід виконання етапу організації життєвого циклу віртуальної спільноти), виконавці напрямів (спеціаліст, який відповідає за виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти).

Для швидкого та якісного виконання поставлених завдань згідно з метою та цілями створення віртуальної спільноти постає необхідність визначення критичності показників завдань організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Для визначення критичності показників необхідні реальні та планові показники завдань організації життєвого циклу віртуальної спільноти.

Аналіз досліджень та публікацій

Зважаючи на бурхливий розвиток віртуальних спільнот, актуальними є такі напрями наукових досліджень:

- безпека та інформаційні війни у віртуальних спільнотах (пропаганда або поширення дезінформації) [4];
- створення та управління віртуальними спільнотами [5];
- створення та керування інформаційним наповненням віртуальної спільноти [6];
- залучення та моніторинг користувачів віртуальної спільноти, соціально-демографічні характеристики користувачів віртуальної спільноти [7];
- маркетинг та реклама у віртуальній спільноті [8];
- дослідження організації життєвого циклу віртуальної спільноти [9].

Проте, дослідження з організації життєвого циклу віртуальних спільнот є неповними та недосконалими, носять епізодичний характер. Зважаючи на особливості віртуальної спільноти як проекту необхідно приділити увагу напрямам та показникам організації життєвого циклу віртуальної спільноти.

Формулювання цілей

Сьогодні віртуальні спільноти формують унікальне інформаційне наповнення мережі Інтернет, яке є джерелом актуальної інформації та її ефективним обміном. Формалізація життєвого циклу віртуальної спільноти забезпечує якісніший підхід до процесів планування, аналізу, розробки та управління віртуальною спільнотою. Однією з основних задач організації життєвого циклу віртуальної спільноти є формування та виконання завдань напрямів. Тому, основною метою роботи є визначення критичності показників для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальних спільнот.

Визначення критичності показників завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальних спільнот

Показники завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти поділяються на:

Плановий (IndPlan) – показник, необхідний для виконання завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Вибір планових показників здійснює менеджер організації життєвого циклу віртуальних спільнот на основі аналізу предметної області віртуальної спільноти та співвідношенні з еталонними показниками.

Еталонний показник (IndEtalon) – показник, сформований менеджером спільноти на основі аналізу еталонних спільнот. Еталонними спільнотами вважатимемо спільноти суміжним до створюваної віртуальної спільноти: спільноти-конкуренти, спільноти одного позиційного класу, спільноти-партнери та ін.

Показник на основі аналізу (IndAnalysis) – показник, сформований на основі аналізу предметної області організації життєвого циклу віртуальної спільноти.

Реальний (IndReal) – показник, призначений для виконання завдань напряму, виходячи з реального стану організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Реальний показник включає:

- ***IndIn*** – вхідний показник для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти, сформований на попередньому етапі;
- ***IndOut*** – вихідний показник для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти, сформований для наступного етапу.

В ході виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти менеджер та виконавець напряму працюють з плановими та реальними показниками.

Під час визначення критичності показники завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти поділяються на:

- критичні;
- некритичні;
- важливі.

Формування показників завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти відбувається за наступною схемою (рис. 1).

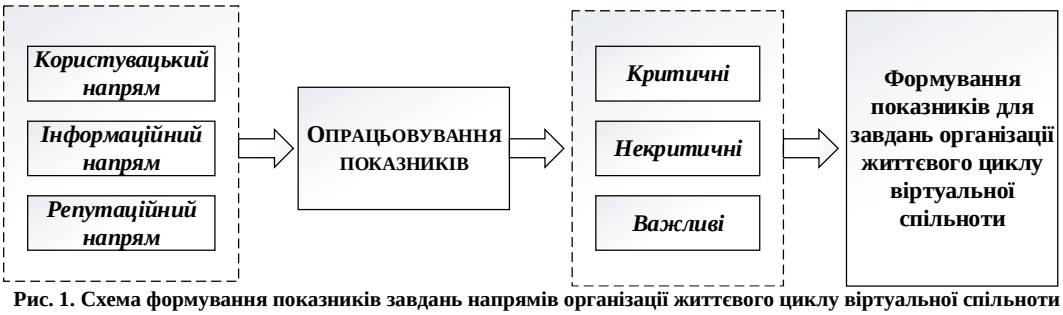


Рис. 1. Схема формування показників завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти

Критичні показники завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти показники є критичними. В разі невиконання нерівності необхідно відхилити виконання завдань.

Виконання завдань напрямів здійснюється, якщо виконується наступна нерівність:

$$\Delta k_i^{Dr} \le \Delta^* k_i^{Dr}, \quad (1)$$

$$\Delta k_i^{Dr} = \begin{cases} 0, якщо IndPla\ n < IndIn \\ \dfrac{IndPlan - IndIn}{IndPlan}, якщо IndPla\ n > IndIn \end{cases}, \quad (2)$$

де $\Delta^* k_i^{Dr}$ – допустима дельта, встановлюється менеджером організації життєвого циклу віртуальної спільноти; *IndPlan* – плановий показник завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти; *IndIn* – реальний показник завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти,

сформований на попередньому етапі;

$Dr \in \{Us, Inf, Rp, Rs\}$ – користувацький, інформаційний, репутаційний та ресурсний напрями організації життєвого циклу віртуальної спільноти відповідно.

Алгоритм визначення критичних показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти (рис. 2) розроблений з метою визначення критичності показника завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти та доцільності виконання завдання.

За виконання алгоритму визначення критичних показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти відповідає виконавець напряму та менеджер спільноти, який відповідає за встановлення допустимої дельти визначення критичності показника.

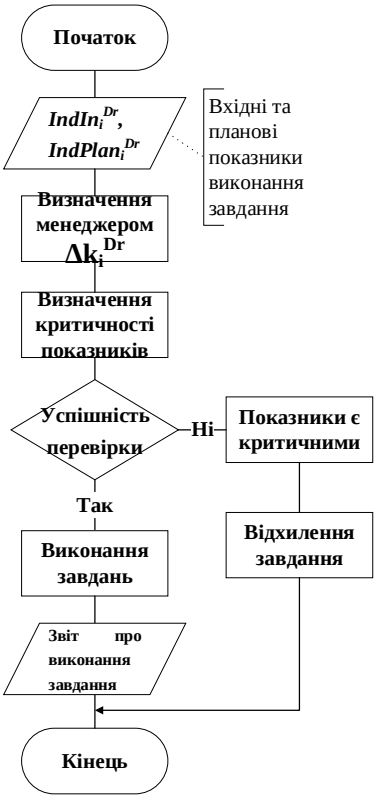


Рис. 2. Алгоритм визначення критичних показників завдання напряму організації життєвого циклу

Результатом виконання алгоритму є визначення критичності показників та виконання завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти чи його відхилення.

Некритичні показники завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Показники завдань напрямів є некритичними для виконання завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти.

Нехай ρ – числова міра відмінності між плановими та реальними показниками завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти, відстань між ними. Δk_i^{Dr} визначається за формулою (2).

Некритичні показники завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти визначається за допомогою формули:

$$\rho = \sum (\Delta k_i^{Dr})^2 . \quad (3)$$

Алгоритм визначення некритичних показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти (рис. 3) розроблений з метою визначення некритичності показника завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти та виконання завдання.

За виконання алгоритму визначення некритичних показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти відповідає виконавець напряму та менеджер спільноти, який відповідає за встановлення допустимої дельти визначення некритичності показника.

Результатом виконання алгоритму є визначення некритичності показників та виконання завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти.

Важливі показники завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти. Важливість показника завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти вказує на критичність окремих показників. Виконання завдання відбуватиметься тільки з використанням важливих показників, інші будуть відкинені. Для визначення важливості показника використаємо евклідову міру близькості.

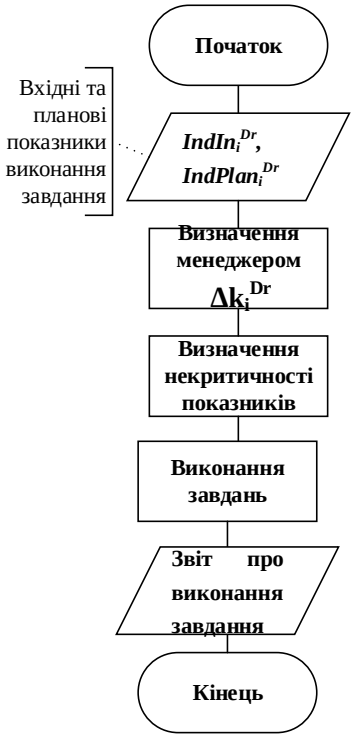


Рис. 3. Алгоритм визначення некритичних показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти

Важливі показники завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти визначається, якщо виконується нерівність:

$$IndN \le \rho , \tag{4}$$

$IndN$ обчислюється за формулою:

$$IndN = \sqrt{\sum (Ind_i^{Dr})^2 * w_i^{Dr}} , \tag{5}$$

де $Ind_i^{Dr} = \begin{cases} 0, якщо IndPla\ n < IndIn \\ (IndPlan - IndIn), якщо IndPla\ n > IndIn \end{cases}$, w_i^{Dr} – ваговий коефіцієнт, визначаються менеджером організації життєвого циклу віртуальної спільноти, $0 \ge w_i \le 1$, $w_i \in w$, $\sum_{w_i \in w} w_i = 1$; $IndPlan$ – плановий показник завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти; $IndIn$ – реальний показник завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти, сформований на попередньому етапі; $Dr \in \{Us, Inf, Rp, Rs\}$ – користувацький, інформаційний, репутаційний та ресурсний напрями організації життєвого циклу віртуальної спільноти відповідно.

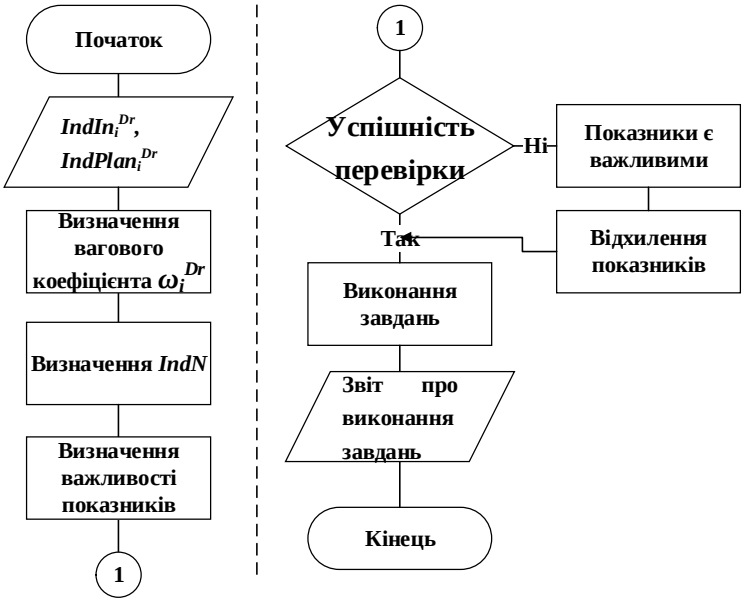


Рис. 4. Алгоритм визначення важливих показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти

Алгоритм визначення важливості показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти (рис. 4) розроблений з метою визначення важливих показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти, відхилення недоцільних показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти та виконання завдання.

За виконання алгоритму визначення важливих показників завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти відповідає виконавець напряму та менеджер спільноти, який відповідає за встановлення допустимої дельти визначення некритичності показника.

Результатом виконання алгоритму є визначення важливих показників, відхилення недоцільних показників та виконання завдання напряму організації життєвого циклу віртуальної спільноти.

Висновки. В статті визначено поділ критичності показників для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти на критичні, некритичні та важливі. Розроблено алгоритми визначення критичних, некритичних та важливих показників для виконання завдань напрямів організації життєвого циклу віртуальної спільноти. В подальшому описані дослідження використовуватимуться у програмному засобі «Організація життєвого циклу віртуальної спільноти», який необхідний для якісного та структурованого створення віртуальної спільноти з виділеними проектними особливостями, управлінськими функціями та послідовними завданнями.

Література

1. Пелещишин А. М. Основні етапи життєвого циклу формування студентських спільнот ВНЗ / А. М. Пелещишин, О. Р. Трач // «Інформатизація вищого навчального закладу». Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – С. 76–84.

2. Trach O. Functional-network model of tasks performance of virtual communication life cycle directions / O. Trach, A. Peleshchyshyn // Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference (CSIT 2016). – Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. – P. 108–110.

3. Трач О. Виконавці організації життєвого циклу віртуальної спільноти / О. Трач // Інформація, комунікація, суспільство 2016 : матеріали 5-ї Міжнар. наук. конф. ІКС – 2016, 19–21 трав. 2016 р., Україна, Львів, Славське / Мін-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Л., 2016. – С. 74–75.

4. Huminskyi R.V. Suggestions for Informational Influence on a Virtual Community / R.V. Huminskyi, A.M. Peleshchyshyn and Z. Holub // International Journal of Computer Science and Business Informatics. – 2015. – № 15, (1). – P. 47–65.

5. Wang J. T. Creating the sustainable conditions for knowledge information sharing in virtual community / J. T. Wang, J. M. Yang, Q. Chen, S. B. Tsai // Springerplus. — 2016. – № 5. – P. 9.

6. Tamjidyamcholo A. Evaluation model for knowledge sharing in information security professional virtual community / A. Tamjidyamcholo, N. L. Shuib, V. A. Rohani // Computers & Security. – 2014. – № 43. – P. 19–34.

7. Fedushko S. Development of verification system of socio-demographic data of virtual community member / S. Fedushko // Radio Electronics Computer Science Control. – 2016. – № 3. – P. 87–92.

8. Fedushko S. Validation of the user accounts personal data of online academic community / S. Fedushko, Yu. Syerov, R. Korzh // IEEE XIIIth Intern. Conf. “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Lviv-Slavske, February 23–26, 2016. – P. 863–866.

9. Jungwirth B. The New Community Rules: Market-ing on the Social Web / B. Jungwirth // Technical Communication. – 2011. – № 58. – P. 90–91.

References

1. Peleshchyshyn A., Trach O. The main stages of the life cycle of the formation of student communities of universities. "Informatization of a higher educational institution". Bulletin of the Lviv Polytechnic National University, 2015, 76-84.

2. Trach O., Peleshchyshyn A. Functional-network model of tasks performance of virtual communication life cycle directions. Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference (CSIT 2016). Lviv Polytechnic Publishing House, 2016, 108-110. – doi: 10.1109/STC-CSIT.2016.7589881

3. Trach O. Performers organize the life cycle of the virtual community. Information, Communication, Society 2016: Materials of the 5th International sciences conf. ICS - 2016, May 19-21. 2016, Ukraine, Lviv, Slavske, 2016, 74-75.

4. Huminskyi R., Peleshchyshyn A., Holub Z. Suggestions for Informational Influence on a Virtual Community. International Journal of Computer Science and Business Informat-ics, 2015, 15, (1), 47-65.

5. Wang J., Yang J., Chen Q., Tsai S. Creating the sustainable conditions for knowledge information sharing in virtual community. Springerplus, 2016, № 5, 9.

6. Tamjidyamcholo A., Shuib L., Rohani V. Evaluation model for knowledge sharing in information security professional virtual community. Computers & Security, 2014, № 43, 19-34.

7. Fedushko S. Development of verification system of socio-demographic data of virtual community member. Radio Elec-tronics Computer Science Control, 2016, № 3, 87-92.

8. Fedushko S., Syerov Yu., Korzh R. Validation of the user accounts personal data of online academic community, IEEE XIIIth Intern. Conf. “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, Lviv-Slavske, February 23 – 26, 2016, 863-866.

9. Jungwirth B. The New Community Rules: Market-ing on the Social Web. Technical Communication, 2011, № 58, 90-91.

Рецензія/Peer review : 07.09.2017 р. Надрукована/Printed :32.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. А. М. Пелещишин

УДК 004.021

І.З. МАНУЛЯК
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
С.І. МЕЛЬНИЧУК
Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОВЗНОГО ЗНАЧЕННЯ ОЦІНКИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕНТРОПІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ

Проблема використання інформативних складових інформаційно-вимірювального сигналу первинних перетворювачів в експлуатаційних умовах ускладнюється наявністю спотворень, які виникають внаслідок нестабільного функціонування чутливого (мірного) елементу, а також впливом завад каналу передачі даних. Така ситуація зумовлює необхідність проведення досліджень та розробок, зокрема в області цифрового опрацювання потокових інформаційно-вимірювальних сигналів для платформ з обмеженими обчислювальними ресурсами. Крім того, використання статистичних оцінок, зокрема інформаційної ентропії, дозволяє відмовитись від використання нелінійних елементів, які змінюють свої характеристики з плином часу, у схемних реалізаціях цифрових засобів первинного перетворення сигналу.

Ключові слова: алгоритмічне забезпечення, оцінка ентропії, ковзне значення.

IRYNA ZINOVIIVNA MANULYAK
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
STEPAN IVANOVYCH MELNYCHUK
V. Stefanyk Precarpathian National University

THE ALGORITHMIC SUPPORT IMPLEMENTATION FOR SLIDING VALUE CALCULATION OF THE INFORMATION ENTROPY ESTIMATION OF MEASURING SIGNALS

The problem of using the informative components of the information-measuring signal of the primary converters under operational conditions is complicated by the presence of distortions that arise due to the unstable operation of the sensitive (milling) element, as well as the effect of the data channel congestion. Such a situation necessitates research and development, in particular in the field of digital processing of streaming information-measuring signals for platforms with limited computing resources. In addition, the use of statistical estimates, in particular information entropy, allows us to refuse the use of nonlinear elements that change their characteristics over time, in the circuit implementations of digital means of primary signal transformation. Developed algorithmic support is aimed at implementation on digital platforms with limited computing resources, in particular on the basis of serial microcontrollers, which will not require replacement of the measured nodes and will ensure the effective processing of measuring signals in the implementation of information measurement channels of automatic and automated accounting and control systems for energy consumption.

Keywords: algorithmic support, estimation of entropy, moving value.

Вступ

Промислові реалізації інформаційно-вимірювальних каналів найчастіше реалізують на основі уже функціонуючих первинних перетворювачів, які додатково обладнують засобами формування і телепередачі вимірювальних сигналів. Такий підхід потребує менших матеріальними затрат порівняно з повною заміною замірних вузлів, які експлуатуються [1]. Доцільно зазначити, що більшість первинних перетворювачів з рухомим мірним елементом реалізують представлення дискретних величин вимірюваного параметру одиничними імпульсами, тобто дані подаються в унітарному базисі. Такий підхід зумовлений простотою схемотехнічних та алгоритмічних рішень їх опрацювання, а також мініатюризацією обладнання каналів обміну даними та зниженням вартості цифрових пристроїв опрацювання. Однак, доцільно зазначити, що згаданий підхід характеризується низькою завадостійкістю, що не дозволяє забезпечити прийнятні експлуатаційні характеристики при збільшенні довжини каналу обміну даними, в умовах дії завад промислового характеру, зокрема імпульсних, які виникають внаслідок комутації високовольтного обладнання.

Одним з варіантів вирішення проблем, пов’язаних з використанням унітарного базису, при опрацюванні імпульсних сигналів є використання їх статистичних характеристик. Зокрема, при використанні оцінок інформаційної ентропії апаратна реалізація не потребує використання АЦП, достатнім є компаратор [2]. За результатами опрацювання експериментальних реалізацій сигналу встановлено, що зі зменшенням розміру вибірки кількість значень вимірювального сигналу, що дозволяють однозначно його ідентифікувати при опрацюванні, зменшується. З метою оцінки можливого зменшення апаратних затрат, при опрацюванні згаданих сигналів на основі статистичних оцінок, проведено дослідження впливу розрядності АЦП на адекватність виділення вимірювальних сигналів. Результати імовірності однозначного детектування імпульсів первинного перетворювача за оцінками дисперсії D_x та інформаційної ентропії H_x, розрахованих за інформаційною мірою К. Шеннона, надано на рисунку 1а [2, 3].

Як можна побачити, для випадку використання однорозрядного АЦП, тобто компаратора, оцінки інформаційної ентропії характеризуються кращою імовірністю детектування вимірювальних сигналів. В ході проведених досліджень [2] підтверджено перспективність запропонованого підходу, а також встановлено, що використання оцінок інформаційної ентропії, при опрацюванні імпульсних амплітудних сигналів, забезпечує найбільше відношення *w* сигнал/завада за однокового розміру фрагменту при використанні компаратора.

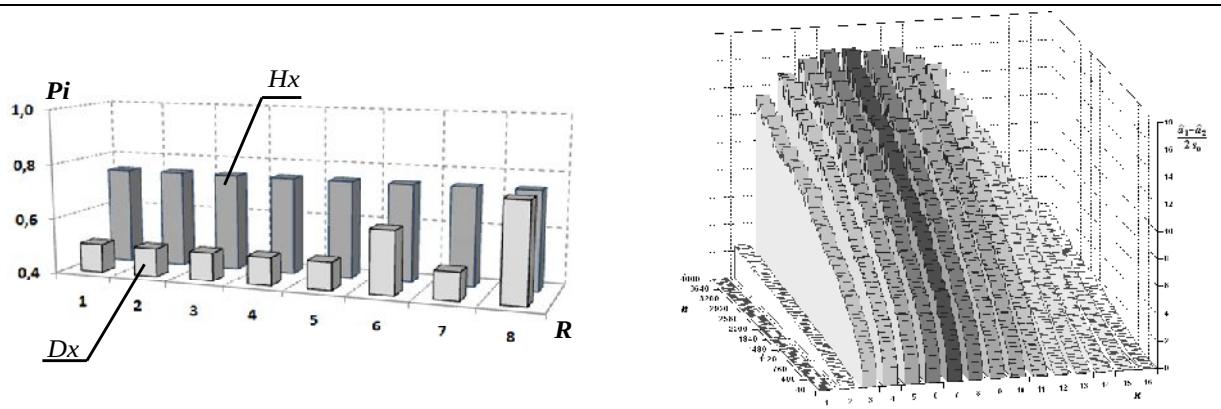


Рис. 1. а) імовірність однозначного детектування імпульсу для D_x та H_x; б) залежність ефективності оброблення сигналів від розміру вибірки *n* та розрядності АЦП – *R*

Проведені у [3] дослідження дозволяють оцінити вплив розрядності АЦП на ефективність опрацювання випадкових широкосмугових сигналів з маніпульованою інформаційною ентропією, що використовуються як бітові ознаки, в каналах обміну даними. Результати проведених досліджень дозволяють встановити залежність ефективності застосування АЦП з різною розрядністю *R* для вибірок розмірністю *n* до 4000 елементів при обчисленні ентропійних оцінок за формулою Шеннона, рис. 1б. Як можна побачити, збільшення розрядності АЦП при обчисленні імовірнісних оцінок послідовних фрагментів сигналу забезпечує зростання обраного показника ефективності лише до моменту використання 7 розрядів (128 можливих станів), подальше збільшення призводить до його поступового зниження, тобто ефективність оброблення погіршується. Таким чином, при реалізації інформаційно-вимірювальних каналів на основі широкосмугових комунікаційних каналів достатньо використовувати прості 8-розрядні АЦП без суттєвої втрати ефективності опрацювання, що дозволяє спростити апаратне забезпечення, а також обчислювальні затрати при функціонуванні відповідного програмного забезпечення канального рівня.

Доцільно зазначити, що у роботі [4] розглянуто один з можливих варіантів зменшення обчислювальних затрат, які виникають при розрахунку функції логарифма, яка використовується в інформаційній мірі Шеннона. Запропонований підхід передбачає фрагментарну апроксимацію на відрізку [0,1], що відповідає можливим ймовірностям появи бінарного сигналу. В результаті проведених досліджень запропоновано спрощені алгоритми розрахунку оцінок ентропії при опрацюванні випадкових сигналів з відомим значенням ентропії. Коректність отриманих аналітичних виразів підтверджується тим, що величина абсолютної похибки менша по відношенню до флуктуації, що спостерігається в околі усередненого значення оцінок ентропії відповідних інформаційних ознак менша на 1 і 2 порядки відповідно.

Таким чином, на наступному етапі реалізації цифрових засобів опрацювання інформаційно-вимірювальних сигналів виникає необхідність розробки ефективних алгоритмів потокового опрацювання сигналів, зокрема при використанні оцінок ентропії, що розраховують за інформаційною мірою Шенона [5]. Такий підхід дозволить ефективно виділяти, за наявності, інформативну складову вимірювального сигналів, а також забезпечити прийнятну точність, зокрема типових реалізацій первинних перетворювачів витрати, при суттєвому зниженні обчислювальних затрат.

Виклад основного матеріалу

Для, запропонованого в [4], методу опрацювання інформаційно-вимірювальних сигналів, достатнім є використання компаратора, який формує бінарний потік станів сигналу. Таким чином, при реалізації алгоритму розрахунку ковзної оцінки інформаційної ентропії достатнім буде використання лічильника одиничних сигналів Cnt1 за постійної частоти перетворення, яку реалізує функція зчитування стану компаратора CM() і розміру вибірки *n*=185 [2]. Усі проміжні значення сигналу *s*[i] зберігаються в бінарному масиві, що при згаданому розмірі вибірки нескладно реалізувати на основі 24 байт. Блок-схема алгоритму обчислення ковзного значення оцінки інформаційної ентропії сигналів первинного перетворювача витрати представлена на рис. 2.

Алгоритм складається з двох частин. В першій частині за допомогою значень, зчитаних з компаратора *s*[i]=CM(), заповнюється масив сигналів, одночасно лічильник Cnt1 підраховує кількість його одиничних станів. На наступному етапі обчислюється імовірність появи «1» і розраховується імовірність появи «0» за якими, в подальшому, розраховується оцінка інформаційної ентропії. На онові порогового значення отриманої оцінки H_x робиться висновок про наявність чи відсутність імпульсів інформаційно-вимірювальних сигналів на виході первинного перетворювача.

В другій частині алгоритму на основі порівнювання поточного стану лічильника та тимчасової змінної стану sV=CM(), яка містить новий зчитаний стан сигналу приймається рішення щодо перезапису цього стану в бінарний масив з подальшим перерахунком ймовірностей появи його одиничних значень. Після чого відбувається повернення в частину розрахунку імовірності появи нульових станів та обчислення нового значення оцінки інформаційної ентропії сигналу.

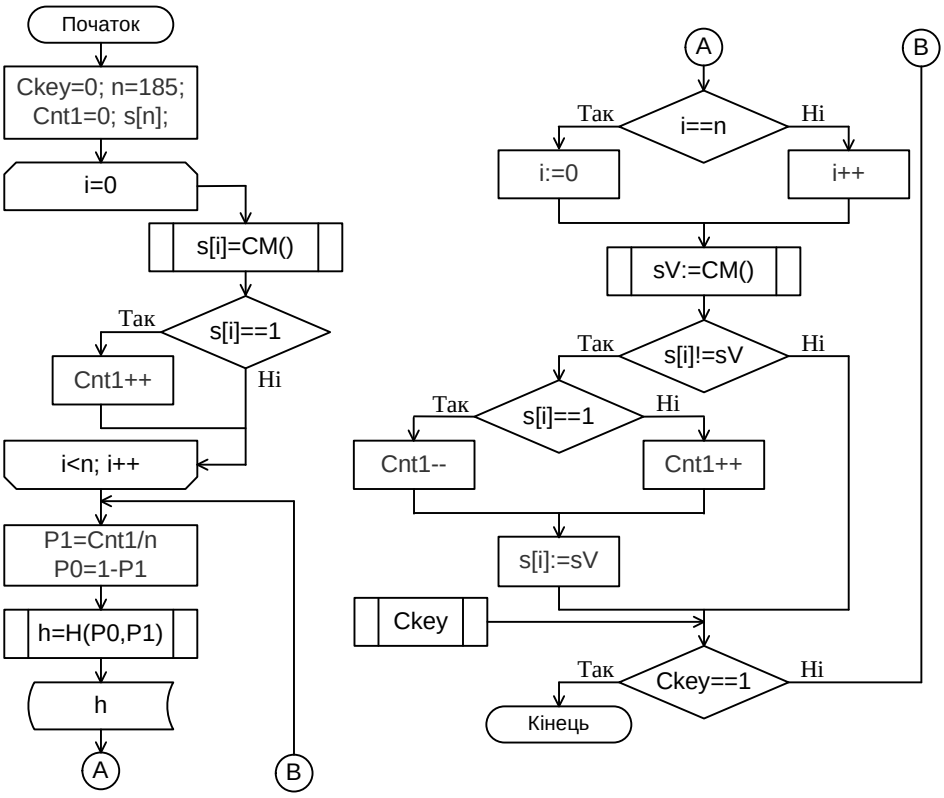


Рис. 2. Блок-схема розрахунку ковзного значення оцінок інформаційної ентропії для бінарного інформаційно-вимірювального сигналу

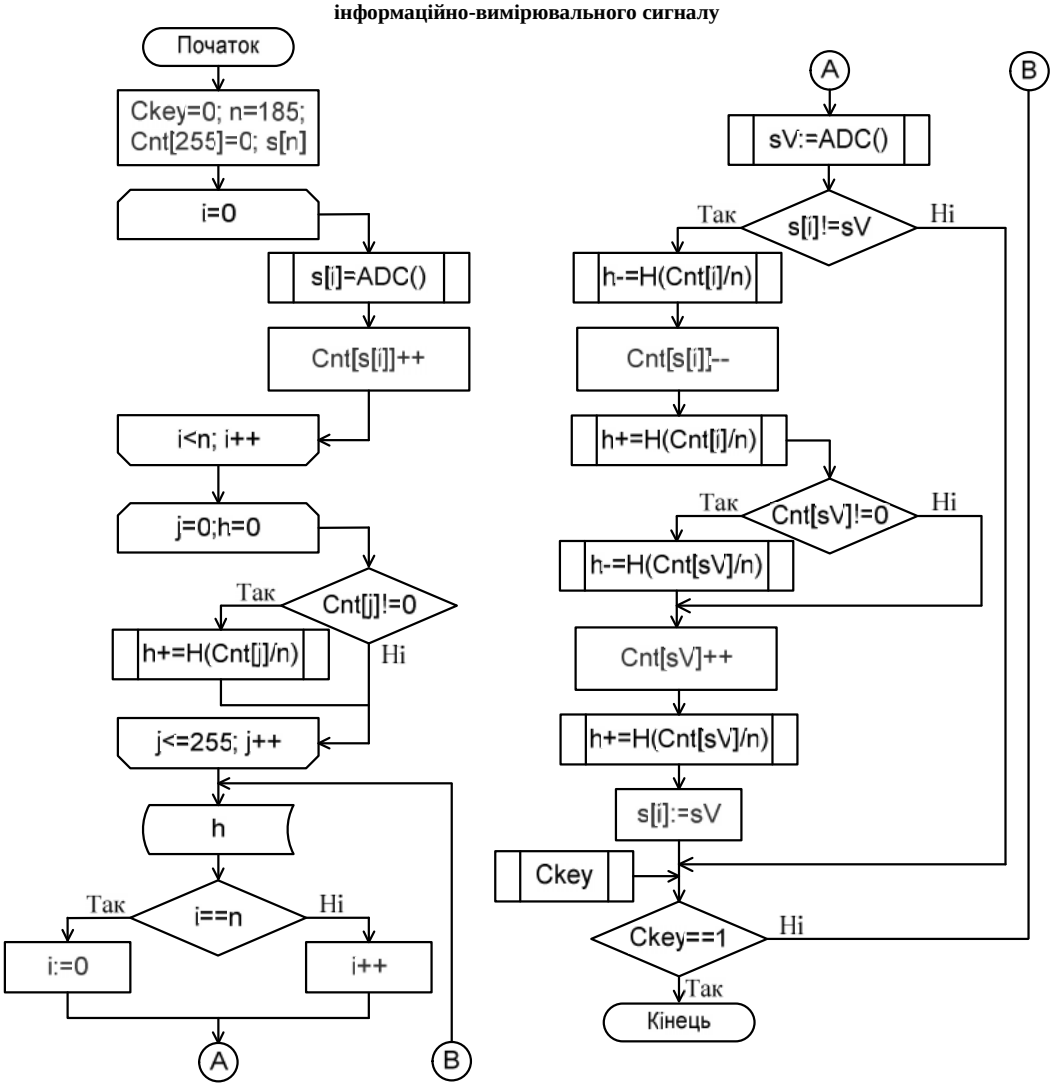


Рис. 3. Блок-схема розрахунку ковзного значення оцінок інформаційної ентропії для багаторівневого (256) інформаційно-вимірювального сигналу

Таким чином, після надходження кожного наступного біту сигналу відбувається зміна стану лічильника Cnt1 в залежності від отриманого значення, що використано для розрахунку нової оцінки інформаційної ентропії. Запропонований підхід не потребує циклічних опрацювань масиву сигналу *s*[i], що дозволяє суттєво скоротити кількість операцій. Для завершення роботи використано проміжну змінну Ckey, як ознаку, яка може змінюватись стороннім процесом (різного роду перериваннями таймера, порта тощо).

Доцільно зазначити, що в роботах [3, 6] показано ефективність застосування оцінки інформаційної ентропії при опрацюванні багаторівневого сигналу, зокрема в роботі [3] показано ефективність використання 8-розрядного АЦП, що зумовлює необхідність розробки алгоритмічного забезпечення розрахунку оцінки ентропії. З огляду на те, що в більшості випадків [7–10] сучасні мікроконтролерні платформи оснащуються 8-розрядним АЦП, який дозволяє опрацювати 256 станів сигналу, що при запропонованому підході потребує використання масиву лічильників Cnt[256] кожного з можливих станів.

Аналогічно до попереднього випадку, стани сигналу формує функція перетворення *s*[i]=ADC(), які заповнюють масив сигналу розмірності *n*. Паралельно з тим, кожне з проміжних значень *s*[i] інкрементує стан відповідного лічильника. Як і в попередньому випадку перша частина алгоритму завершується після заповнення масиву станів сигналу, після чого розраховуються імовірності появи кожного з можливих станів, за якими далі обчислюється оцінка інформаційної ентропії. Блок-схема розрахунку ковзного значення оцінок інформаційної ентропії подано на рис. 3. В другій частині алгоритму розраховується ковзне значення оцінки інформаційної ентропії. Надходження кожного нового значення стану сигналу зберігається в проміжні змінній sV=ADC(). Далі відбувається зменшення кількості станів сигналу лічильника, на який вказує попереднє значення *s*[i] і збільшується лічильник, на який вказує поточне значення з sV, після чого *s*[i] поновлюється через проміжну змінну sV. На наступному кроці реалізується обчислення відповідних імовірностей появи тільки для двох станів сигналу, що змінились, і оновлений масив станів сигналу використовується для розрахунку нового значення оцінки інформаційної ентропії сигналу.

Як і в попередньому випадку, відсутня необхідність циклічного опрацювання масиву станів сигналу. Змінна Ckey використана як ознака завершення розрахунку ковзного значення оцінки інформаційної ентропії.

З метою оцінювання ефективності запропонованих рішень, порівняно з алгоритмами прямого розрахунку за масивом, запропонованих в [11–13], проведено дослідження кількості операцій за типами, що використовуються в алгоритмах при розрахунку ковзного значення оцінки ентропії. Результати згаданих досліджень надано в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика кількості операцій запропонованих алгоритмів

Операції / Алгоритми	(+), (-)	(*), (/)	Умовні	H_x
Компаратор за масивом	185	1	185	1
Компаратор ковзні значення	3	1	4	1
АЦП за масивом	256	256	256	1
АЦП ковзні значення	7	4	4	4

Доцільно зазначити, що порівняння проводилися для випадку максимально можливої кількості станів сигналу, яка спостерігається при рівномірному розподілі. У випадку нормального розподілу кількість операцій для алгоритмів опрацювання за масивом менша.

Висновки

В результаті розробки алгоритмічного забезпечення функцій розрахунку ковзних значень інформаційної ентропії для бінарних та багатостанових інформаційно-вимірювальних сигналів запропоновано підходи, які дозволяють звести кількість необхідних операцій до 10% від початкової кількості, порівняно з прямим розрахунком за масивом. Однак, для багаторівневого сигналу виникає необхідність додаткових викликів функції розрахунку оцінки інформаційної ентропії, що потребує проведення подальших досліджень. Крім того, запропоноване алгоритмічне забезпечення нескладно реалізувати в коді платформ з обмеженими обчислювальними ресурсами, зокрема на основі серійних мікроконтролерів, що не потребуватиме заміни замірних вузлів і забезпечить ефективне опрацювання вимірювальних сигналів під час реалізації інформаційно-вимірювальних каналів.

Література

1. Пряха Б.Г. Про числові характеристики результатів вимірювань / Б.Г. Пряха / Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід. – Чернігів : ЧДІЕУ, 2008. – 243 с.

2. Мельничук С.І. Застосування статистичних характеристик для опрацювання імпульсних сигналів первинних перетворювачів витрати представлених в унітарному базисі / С.І. Мельничук, І.З. Мануляк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 5. – С. 217–222.

3. Мельничук С. І. Дослідження впливу розрядності АЦП на ефективність оброблення широкосмугових сигналів зі змінною ентропією в інформаційних каналах автоматизованих систем / С. І. Мельничук // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник / Національний університет "Львівська політехніка" ;

відповідальний редактор З. А. Стоцько. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2009. – Випуск 43. – С. 88–93.

4. Мельничук С.І. Оптимізація алгоритму обчислення оцінок інформаційної ентропії випадкових сигналів для цифрових засобів обміну даними. / С.І. Мельничук, М.В. Коропецька, І.З. Мануляк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 3. – С. 141–148.

5. Жураковський Ю.П. Теорія інформації кодування : [підручник] / Ю.П. Жураковський, В.П. Полторак. – К. : Вища шк., 2001. – 255 с.

6. Мануляк І. З. Алгоритмічні та схемотехнічні засоби опрацювання сигналів імпульсного первинного перетворювача за оцінками інформаційної ентропії / І. З. Мануляк, С. І. Мельничук // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник / Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка» ; відповідальний редактор З. А. Стоцько. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – Випуск 50. – С. 128–136.

7. Мортон Д. Микроконтроллеры AVR. Вводный курс / Джон Мортон. – Изд-во: Издательский дом Додэка-XXI, 2006. – 272 с.

8. Microcontroller (MCU) Product Selection [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ti.com/lsds/ti/microcontrollers-16-bit-32-bit/products.page#

9. Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx

10. STM8L101K3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm8-8-bit-mcus/stm8l-series/stm8l101/stm8l101k3.html.

11. Мельничук С.І. Формування та обробка широкосмугових сигналів на основі випадкових процесів зі змінною ентропією розподілу імовірностей станів / С.І. Мельничук, М.І. Козленко // Наукові вісті. – Івано-Франківськ : Вид-во ІМЕ, 2006. – № 1(9). – С. 28–31.

12. Мельничук С.І. Адаптація алгоритму розрахунку ентропійних оцінок випадкових сигналів з нормальним розподілом у комунікаційних засобах автоматизованих систем / С.І. Мельничук, М.В. Коропецька // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2011. – № 45. – С. 408–414.

13. Мельничук С.І. Розрахунок оцінок ентропії з використанням кореляційних функцій для інформаційних джерел з нормально розподіленими некорельованими станами / С.І. Мельничук, В.М. Василик Я.М. Николайчук // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання (ПНМК-2012) : збірник наукових праць проблемно-наукової міжгалузевої конференції / Інститут менеджменту і аудиту. – 2012. – С. 46.

References

1. Prjaha B.G. Pro chislovi harakteristiki rezul'tativ vimirjuvan' / B.G. Prjaha / Novitni dosjagnennja geodeziї, geoinformatiki ta zemlevporjadkuvannja – Єvropejs'kij dosvid. – Chernigiv : ChDIEU, 2008. – 243 s.

2. Mel'nichuk S.I. Zastosuvannja statistichnih harakteristik dlja opracjuvannja impul'snih signaliv pervinnih peretvorjuvachiv vitrati predstavlenih v unitarnomu bazisi / S.I. Mel'nichuk, I.Z. Manuljak // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2015. – № 5. – S. 217–222.

3. Mel'nichuk S. I. Doslidzhennja vplivu rozrjadnosti ACP na efektivnist' obroblennja shirokosmugovih signaliv zi zminnoju entropiєju v informacijnih kanalah avtomatizovanih sistem / S. I. Mel'nichuk // Avtomatizacija virobnichih procesiv u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni : ukraïns'kij mizhvidomchij naukovo-tehnichnij zbirnik / Nacional'nij universitet "L'vivs'ka politehnika" ; vidpovidal'nij redaktor Z. A. Stoc'ko. – L'viv : Vidavnictvo L'vivs'koї politehniki, 2009. – Vipusk 43. – S. 88–93.

4. Mel'nichuk S.I. Optimizacija algoritmu obchislennja ocinok informacijnoї entropiї vipadkovih signaliv dlja cifrovih zasobiv obminu danimi. / S.I. Mel'nichuk, M.V. Koropec'ka, I.Z. Manuljak // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2015. – № 3. – S. 141–148.

5. Zhurakovs'kij Ju.P. Teorija informacії koduvannja : [pidruchnik] / Ju.P. Zhurakovs'kij, V.P. Poltorak. – K. : Vishha shk., 2001. – 255 s.

6. Manuljak I. Z. Algoritmichni ta shemotehnichni zasobi opracjuvannja signaliv impul'snogo pervinnogo peretvorjuvacha za ocinkami informacijnoї entropiї / I. Z. Manuljak, S. I. Mel'nichuk // Avtomatizacija virobnichih procesiv u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni : ukraïns'kij mizhvidomchij naukovo-tehnichnij zbirnik / Ministerstvo osviti i nauki Ukraïni, Nacional'nij universitet «L'vivs'ka politehnika» ; vidpovidal'nij redaktor Z. A. Stoc'ko. – L'viv : Vidavnictvo L'vivs'koї politehniki, 2016. – Vipusk 50. – S. 128–136.

7. Morton D. Mikrokontrollery AVR. Vvodnyj kurs / Dzhon Morton. – Izd-vo: Izdatel'skij dom Dodjeka-HHI, 2006. – 272 s.

8. Microcontroller (MCU) Product Selection [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.ti.com/lsds/ti/microcontrollers-16-bit-32-bit/products.page#

9. Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.atmel.com/products/microcontrollers/avr/default.aspx

10. STM8L101K3 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm8-8-bit-mcus/stm8l-series/stm8l101/stm8l101k3.html.

11. Mel'nichuk S.I. Formuvannja ta obrobka shirokosmugovih signaliv na osnovi vipadkovih procesiv zi zminnoju entropiєju rozpodilu imovirnostej staniv / S.I. Mel'nichuk, M.I. Kozlenko // Naukovi visti. – Ivano-Frankivs'k : Vid-vo IME, 2006. – № 1(9). – S. 28–31.

12. Mel'nichuk S.I. Adaptacija algoritmu rozrahunku entropijnih ocinok vipadkovih signaliv z normal'nim rozpodilom u komunikacijnih zasobah avtomatizovanih sistem / S.I. Mel'nichuk, M.V. Koropec'ka // Avtomatizacija virobnichih procesiv u mashinobuduvanni ta priladobuduvanni. – L'viv, 2011. – № 45. – S. 408–414.

13. Mel'nichuk S.I. Rozrahunok ocinok entropiї z vikoristannjam koreljacijnih funkcij dlja informacijnih dzherel z normal'no rozpodilenimi nekorel'ovanimi stanami / S.I. Mel'nichuk, V.M. Vasilik Ja.M. Nikolajchuk // Informacijni problemi komp'juternih sistem, jurisprudencії, ekonomiki ta modeljuvannja (PNMK-2012) : zbirnik naukovih prac' problemno-naukovoї mizhgaluzevoї konferencії / Institut menedzhmentu i auditu. – 2012. – S. 46.

Рецензія/Peer review : 12.09.2017 р. Надрукована/Printed :29.10.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Л.М. Заміховський

УДК 665.7:681.2.08

Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ, К.В. ОГОРОДНИК, Н.А. СТОЯН
Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ НАФТОПРОДУКТІВ

В статті представлено методику обробки результатів непрямих вимірювань густини нафтопродуктів, наведено розрахунки систематичних, випадкових та відносних похибок методу, побудовано графіки залежностей величини відносної похибки вимірювання в умовах зміни частоти ультразвукових хвиль та характер зміни відносної похибки вимірювання в заданому діапазоні густин кожного із досліджуваних середовищ.

Ключові слова: частота ультразвукових хвиль, густина нафтопродуктів, відносна похибка, непрямі вимірювання.

Y.Y. BILYNSKY, K.V. OGORODNYK, N.A. STOYAN
Vinnytsa National Technical University

ULTRASONIC METHOD STUDY OF MEASUREMENT OF OIL PRODUCTS

The article presents manufacturers of densimeters, the principle of which is based on ultrasonic methods; theoretical substantiation of this method; formulas for calculating the density of petroleum products at a temperature of 20 ^{0}C and at a variable temperature; method of processing the results of indirect measurements of the density of petroleum products. The calculations of absolute, relative, systematic, random errors of the method are given; the proposed order of operations in processing the results of indirect measurements. The relative errors of measuring the density of petroleum products, namely for gasoline, diesel fuel and motor oil, are calculated; systematic errors are determined for each calculated value of the density of petroleum products. The graphs of the dependencies of the relative measurement error value in the conditions of the change in the frequency of ultrasonic waves and the nature of the change in the relative measurement error in a given range of densities of each of the investigated environments have been constructed, which showed that the maximum error of measuring the density of petroleum products does not exceed 2% in a given range of measurement of the frequencies of ultrasonic waves f, and systematic and random errors lie in the range from 0,005% to 0,02%.

Keywords: frequency of ultrasonic waves, the density of oil, relative error, indirect measurement.

Постановка задачі

Вимірювання густини нафтопродуктів є одним з найбільш трудомістких вимірювальних процесів. Достатньо складно визначати цей параметр при контролі нафтопродуктів під час їхнього виробництва, транспортування та використання, особливо в умовах швидкоплинних технологічних процесів [1]. Застосування ультразвукового методу для вимірювання густини є новим і перспективним розвитку густиномірів. Основними перевагами ультразвукового густиноміра є безінертність та безконтактність вимірювання; відсутність рухомих частин в потоці, втрат тиску в трубопроводах; можливість застосування для вимірювання густини забруднених і агресивних середовищ. Основний недолік – необхідність перед вимірюванням густини викачування повітря із пульп, оскільки повітряні бульбашки значно впливають на поглинання ультразвуку.

Серед виробників густиномірів, принцип роботи яких базується на ультразвуковому методів, відомі компанії, такі як [2] «Markbiz Nigeria» (Нігерія), «Cole Mills Limited» (США), ОАО «Геотрон» (Росія), «TOBIAS Associates» (США). Залежно від схеми і конструкції УЗ-густиномірів їх приведена похибка коливається від ±1,5 до ±3%.

Зважаючи на сказане, в роботі [3] запропоновано метод та засіб вимірювання густини нафтопродуктів, що відрізняється від відомих своєю простотою. Ультразвукові вимірювачі дозволяють в реальному часі здійснювати контроль і моніторинг концентрації, вимірювання густини нафтопродуктів, контроль за розподілом фаз компонентів розчину (рідинна екстракція), що виконуються з високою точністю.

Теоретичне обґрунтування методу наступне. Ультразвуковий (акустичний) метод визначення густини нафтопродуктів базується на тому, що звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), які створюються електроакустичним перетворювачем (випромінювачем), проходять через середовище й реєструються приймачем, який розташований від випромінювача на певній відстані [3, 4].

Границя між ближньою і дальньою зонами наближено визначається формулою [1, 3]:

$$N = \frac{S}{(\pi/2)\cdot\lambda} = \frac{2a^2}{\lambda}, \qquad (1)$$

де N – відстань уздовж осі x (збігається з акустичною віссю перетворювача), S – площа п’єзоелемента; λ – довжина ультразвукової хвилі. Остання частина формули відповідає круглому п’єзоелементу радіусом a.

В [4, 5] досліджено метод визначення густини нафтопродуктів, що полягає у залежності частоти ультразвукових хвиль від густини досліджуваного середовища. Даний метод реалізується наступним чином. Ультразвукові коливання створюються і приймаються електроакустичними перетворювачами. Частоту їх збудження забезпечує генератор змінної частоти. Дані коливання аналізуються за амплітудою за допомогою блоку керування, до складу якого входить мікроконтролер, підсилювач, АЦП та компаратор, й реєструються пікові значення амплітуди в даний момент часу і в попередній за допомогою індикатора. При незмінній густині генератор змінної частоти налаштований на частоту, що відповідає останньому максимуму

ультразвукової хвилі [6].

При зміні густини зменшується амплітуда вихідного сигналу, що призводить до переналаштування частоти. В разі досягнення частоти ультразвукових хвиль, що відповідає максимальній амплітуді, реєструється значення частоти, за якою і розраховують густину.

Швидкість потоку імпульсів визначається за формулою [6]:

$$v = \lambda f = \frac{Z}{\rho}, \tag{2}$$

де f – частота ультразвукової хвилі, Z - акустичний опір середовища, ρ - густина середовища.

Визначивши з формули (1) вираз для знаходження довжини хвилі і підставивши у формулу (2), отримано наступне співвідношення для розрахунку густини (при температурі 20 ^{0}C) [8]:

$$\lambda = \frac{2a^2}{N}, \ \frac{2a^2}{N} \cdot f = \frac{Z}{\rho} \Rightarrow \rho_{20} = \frac{Z \cdot N}{2a^2 \cdot f}. \tag{3}$$

Залежність густини нафтопродуктів ρ_t від температури t має лінійний характер:

$$\rho_t = \rho_{20} - \Delta t \cdot (t - 20) = \frac{Z \cdot N}{2a^2 \cdot f} - \Delta t \cdot (t - 20), \tag{4}$$

де Δt – температурна поправка до густини на 1 ^{0}C.

Вирази (3) та (4) дають змогу запропонувати ультразвуковий метод вимірювання густини нафтопродуктів, що полягає у визначенні частоти поширення ультразвукової хвилі однозначно пов’язаної з густиною об’єкту контролю, при якій визначається останній дифракційний максимум ближньої зони. Але це не є предметом даної роботи.

Очевидними перевагами розглянутого методу вимірювання густини нафтопродуктів є, по-перше, простота, і, по-друге, відсутність рухомих частин в потоці та втрат тиску в трубопроводах.

В роботі ставиться задача дослідження похибок визначення густини нафтопродуктів за запропонованим методом їх вимірювання.

Обробка результатів непрямих вимірювань

У лабораторній практиці більшість вимірювань – непрямі і величина, яка нас цікавить є функцією однієї або декількох безпосередньо вимірюваних величин [7]:

$$N = f(x, y, z, ...). \tag{5}$$

Як випливає з теорії ймовірностей, середнє значення величини визначається підстановкою у формулу (5) середніх значень вимірюваних величин, тобто

$$\overline{N} = f(\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}, ...). \tag{6}$$

Потрібно знайти абсолютну і відносну похибки цієї функції, якщо відомі похибки незалежних змінних. Розглянемо два крайніх випадки, коли похибки є або систематичними, або випадковими. Єдиної думки щодо обчислення систематичної похибки непрямих вимірювань немає. Однак, якщо виходити з визначення систематичної похибки як максимально можливої похибки, то доцільно знаходити систематичну похибку за формулами [7]

$$\delta N = \pm\left[\left|\frac{\partial f}{\partial x}\delta x\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\delta y\right| + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\delta z\right| + ...\right], \tag{7}$$

або

$$\delta N = \pm\overline{N}\left[\left|\frac{\partial \ln f}{\partial x}\delta x\right| + \left|\frac{\partial \ln f}{\partial y}\delta y\right| + \left|\frac{\partial \ln f}{\partial z}\delta z\right| + ...\right], \tag{8}$$

де $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}, ...$ – часткові похідні функції $N = f(x, y, z, ...)$ по аргументу x, y, z..., які знайдені в припущенні, що всі інші аргументи, крім того, за яким знаходиться похідна, постійні; δx, δy, δz – систематичні похибки аргументів. Формулою (7) зручно користуватися в разі, якщо функція має вигляд суми або різниці аргументів. Вираз (8) доцільно застосовувати, якщо функція має вигляд добутку або частки аргументів. Для знаходження випадкової похибки непрямих вимірювань слід користуватися формулами [7, 8]:

$$\Delta N = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\Delta z\right)^2 + ...} \tag{9}$$

або

$$\Delta N = \pm\overline{N}\sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x}\Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y}\Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z}\Delta z\right)^2 + ...} \tag{10}$$

де Δx, Δy, Δz, ... – довірчі інтервали при заданих довірчих ймовірностях (надійностях) для аргументів x, y, z, ... Слід мати на увазі, що довірчі інтервали Δx, Δy, Δz, ... повинні бути взяті при однаковій довірчій ймовірності $P_1 = P_2 = ... = P_n = P$.

У цьому випадку надійність для довірчого інтервалу ΔN буде теж P.

Формулою (9) зручно користуватися в разі, якщо функція $N = f(x, y, z, ...)$ має вигляд суми або різниці аргументів. Формулою (10) зручно користуватися в разі, якщо функція $N = f(x, y, z, ...)$ має вигляд добутку або частки аргументів.

Часто спостерігається випадок, коли систематична похибка і випадкова похибка близькі одна до одної, і вони обидві однаковою мірою визначають точність результату. У цьому випадку загальна похибка $\sum$ знаходиться як квадратична сума випадкової Δ і систематичної δ похибок з ймовірністю не менше ніж P, де P – довірча ймовірність випадкової похибки [8]:

$$\Sigma = \sqrt{\Delta^2 + \delta^2}. \tag{11}$$

При проведенні непрямих вимірювань в не відтворюваних умовах функцію знаходять для кожного окремого вимірювання, а довірчий інтервал обчислюють для отримання значень шуканої величини за тим же методом, що і для прямих вимірювань.

Слід зазначити, що у випадку функціональної залежності, вираженої формулою, зручною для логарифмування, простіше спочатку визначити відносну похибку, а потім з виразу $\Delta N = \varepsilon \bar{N}$ знайти абсолютну похибку.

Перш ніж приступати до вимірювання, завжди треба подумати про подальші розрахунки і виписати формули, за якими розраховуватимуться похибки. Ці формули дозволять зрозуміти, які вимірювання слід проводити особливо ретельно, а на які не потрібно витрачати великих зусиль.

При обробці результатів непрямих вимірювань пропонується наступний порядок операцій [7]:

1. Всі величини, що знаходяться прямими вимірюваннями, обробляються відповідно до правил обробки результатів прямих вимірювань. При цьому для всіх вимірюваних величин задається одне і те ж значення надійності P.

2. Оцінюється точність результату непрямих вимірювань за формулами (7)–(8), де похідні обчислюються при середніх значеннях величин.

Якщо похибка окремих вимірювань входить в результат диференціювання кілька разів, то згруповуються всі члени, що містять однаковий диференціал, і вирази в дужках, що стоять перед диференціалом беруться за модулем; знак d замінюється на Δ (або δ).

3. Якщо випадкова і систематична похибки за величиною близькі одна до одної, то складають їх за правилом додавання похибок. Якщо одна з похибок менше іншої в три чи більше разів, то менша відкидається.

4. Результат вимірювання записуються у вигляді:

$$\mathrm{N} = f(x, y, z, ...) \pm \Delta f .$$

5. Визначається відносна похибка результату серії непрямих вимірювань [8]

$$\varepsilon = \Delta f \,/\, f \cdot 100\%. \tag{12}$$

Оцінка відносної похибки методу

На першому етапі експериментальним способом отримано значення частот ультразвукових хвиль, що відповідають останнім максимумам ближньої зони. Ці дані підставлено у формулу (3) і для кожного значення частоти f розраховано значення густини ρ нафтопродукту. Для бензину отримані такі значення густини $\bar{\rho}$ (0,71; 0,72; 0,73; 0,74; 0,75; 0,76) г/см^3; для дизельного палива – (0,79; 0,8; 0,81; 0,83; 0,85) г/см^3; для моторного масла – (0,89; 0,9; 0,92; 0,93; 0,94) г/см^3.

За допомогою штангенциркуля виміряні діаметри a електроакустичних перетворювачів та відстань N між ними, отримано наступні результати: a = (10±0,05) мм, N = (20±0,05) мм.

Скориставшись формулою (10) маємо наступні значення випадкових похибок для різних середовищ:

$$\ln \rho = \ln z + \ln N - \ln 2 - 2 \ln a - \ln f;$$

$$\frac{\partial \ln \rho}{\partial N} = \frac{1}{N}; \frac{\partial \ln \rho}{\partial a} = -\frac{2}{a}; \; \Delta\rho = \pm\bar{\rho}\sqrt{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(-\frac{2\Delta a}{a}\right)^2};$$

$$\Delta\rho_{б1-б6} = (0{,}00737; 0{,}00747; 0{,}00758; 0{,}00768; 0{,}00779; 0{,}00789) г/см^3;$$

$$\Delta\rho_{п1-п5} = (0{,}00821; 0{,}0083; 0{,}0084; 0{,}00862; 0{,}00882) г/см^3;$$

$$\Delta\rho_{м1-м5} = (0{,}00924; 0{,}009342; 0{,}00955; 0{,}00965; 0{,}00976) г/см^3.$$

На основі формули (8), адже функція має вигляд частки аргументів, визначено систематичні похибки для кожного розрахованого значення густини нафтопродуктів:

$$\delta\rho = \pm\bar{\rho}\left(\frac{\delta N}{N} - \frac{2\delta a}{a}\right);$$

$$\delta\rho_{б1-б6} = (0,00533; 0,0054; 0,00548; 0,00568; 0,00576; 0,00584)\text{г/см}^3;$$

$$\delta\rho_{п1-п5} = (0,00607; 0,00614; 0,00622; 0,00637; 0,00653)\text{г/см}^3;$$

$$\delta\rho_{м1-м5} = (0,00684; 0,00691; 0,00707; 0,00714; 0,00722)\text{г/см}^3.$$

Оскільки, випадкові і систематичні похибки за величиною близькі одна до одної, тоді з формули (11):

$$\Delta\rho' = \sqrt{\Delta^2 + \delta^2};$$

$$\Delta\rho'_{б1-б6} = (0,00909; 0,00922; 0,00935; 0,00955; 0,00969; 0,00981)\text{г/см}^3;$$

$$\Delta\rho'_{п1-п5} = (0,0102; 0,01033; 0,01045; 0,01072; 0,01097)\text{г/см}^3;$$

$$\Delta\rho'_{м1-м5} = (0,01149; 0,01162; 0,01188; 0,01201; 0,01214)\text{г/см}^3.$$

Таким чином, отримано наступні результати вимірювання:

- для бензину:

$$\rho_{б1} = (0,71 \pm 0,00909)\text{г/см}^3; \rho_{б2} = (0,72 \pm 0,00922)\text{г/см}^3; \rho_{б3} = (0,73 \pm 0,00935)\text{г/см}^3;$$

$$\rho_{б4} = (0,74 \pm 0,00955)\text{г/см}^3; \rho_{б5} = (0,75 \pm 0,00969)\text{г/см}^3; \rho_{б6} = (0,76 \pm 0,00981)\text{г/см}^3;$$

- для дизельного палива:

$$\rho_{п1} = (0,79 \pm 0,0102)\text{г/см}^3; \rho_{п2} = (0,8 \pm 0,01033)\text{г/см}^3; \rho_{п3} = (0,81 \pm 0,01045)\text{г/см}^3;$$

$$\rho_{п4} = (0,83 \pm 0,01072)\text{г/см}^3; \rho_{п5} = (0,85 \pm 0,01097)\text{г/см}^3;$$

- для моторного масла:

$$\rho_{м1} = (0,89 \pm 0,01149)\text{г/см}^3; \rho_{м2} = (0,9 \pm 0,01162)\text{г/см}^3; \rho_{м3} = (0,92 \pm 0,01188)\text{г/см}^3;$$

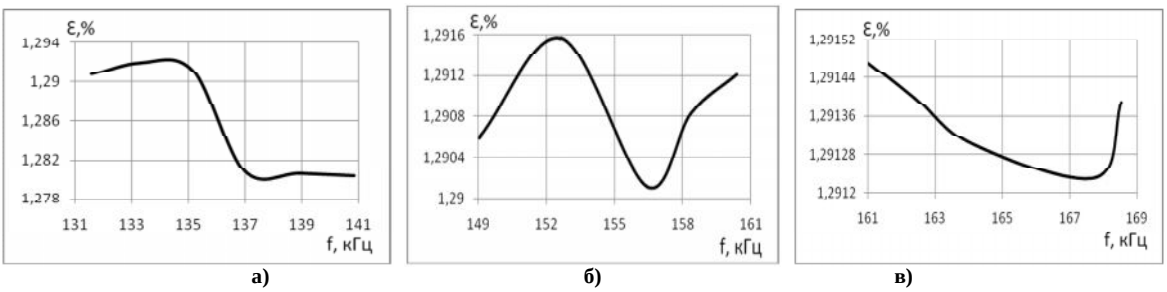
$$\rho_{м4} = (0,93 \pm 0,01201)\text{г/см}^3; \rho_{м5} = (0,94 \pm 0,01214)\text{г/см}^3.$$

Скориставшись формулою (12), розраховано відносні похибки вимірювання для кожного досліджуваного середовища:

$$\varepsilon_{б1-б6} = (1,28028; 1,28056; 1,28082; 1,29117; 1,292; 1,29079)\%;$$

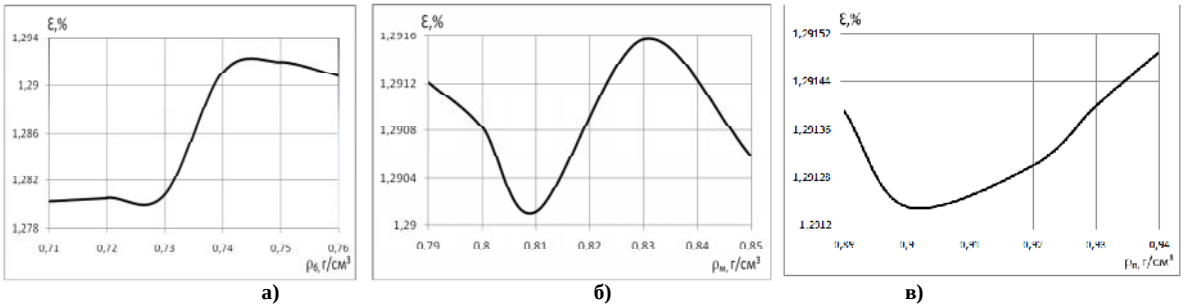
$$\varepsilon_{п1-п5} = (1,29121; 1,29083; 1,29012; 1,29157; 1,29059)\%;$$

$$\varepsilon_{м1-м5} = (1,29139; 1,29123; 1,2913; 1,2914 : 1,29149)\%.$$



а) б) в)

Рис. 1. Залежність відносної похибки вимірювання густини нафтопродуктів в умовах зміни частоти ультразвукових хвиль: а – бензин, б – дизельне паливо, в – моторне масло



а) б) в)

Рис. 2. Характер зміни відносної похибки вимірювання частоти ультразвукових хвиль кожного із досліджуваних середовищ: а – бензин, б – дизельне паливо, в – моторне масло

На основі розрахунків побудовано графіки залежності відносної похибки вимірювання густини нафтопродукту в умовах зміни частоти ультразвукових хвиль (рис. 1) та графіки характеру зміни відносної похибки вимірювання частоти ультразвукових хвиль кожного із досліджуваних середовищ (рис. 2).

Висновки

Представлено методику обробки результатів непрямих вимірювань густини нафтопродуктів, наведено розрахунки систематичних, випадкових та відносних похибок методу, побудовано графіки

залежності величини відносної похибки вимірювання в умовах зміни частоти ультразвукових хвиль та графіки характеру зміни відносної похибки вимірювання в заданому діапазоні густин кожного із досліджуваних середовищ. Аналіз отриманих даних показав, що максимальна похибка вимірювання густини нафтопродуктів не перевищує 2% в заданому діапазоні вимірювання частот ультразвукових хвиль *f*, а систематична і випадкова похибки лежать в межах від 0,005% до 0,02 %.

Література

1. Артемьев Б. В. Неразрушающий контроль / Артемьев Б. В., Туробов Б. В., Матвеев В. И. и др. ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Издательский дом "Спектр", 2012. – 528 с.
2. Производственно-коммерческая группа «Гранат». Каталог продукции [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://granat-e.ru/lpgdi.html – (Дата звернення 07.07.2017). – Назва з екрану.
3. Білинський Й. Й. Аналіз методів і засобів вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена // Наукові праці ВНТУ. – Вінниця, 2016. – 13 с.
4. Білинський Й. Й. Ультразвуковий метод та засіб вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, Н. А. Стоян // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2017. – № 1. – С. 55–59.
5. Пат. 107963 Україна, МПК G01F 1/66. Пристрій вимірювання густини нафтопродуктів / Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена. – № U 2016 00012 ; заявл. 04.01.2016 ; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12, 2016 р.
6. Пат. 111788 Україна, МПК G01N 11/00. Ультразвуковий густиномір / Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, Н. А. Яремішена. – № U 2016 04481 ; заявл. 22.04.2016 ; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22, 2016 р.
7. Бессонов А. А. Введение в лабораторный практикум по физике / А. А. Бессонов, К.А. Дергобузов [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://teachmen.ru/methods/phys_prac8.html – (Дата звернення 20.05.2017). – Назва з екрану.
8. Кассандров О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандров, В. В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 200 с.

References

1. Artemev B. V. Nerazrushaiushchyi kontrol / Artemev B. V., Turobov B. V., Matveev V. Y. y dr. ; pod obshch. red. V. V. Kliueva. – M. : Yzdatelskyi dom «Spektr», 2012. – 528 s.
2. Proyzvodstvenno-kommercheskaia hruppa «Hranat». Kataloh produktsyy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://granat-e.ru/lpgdi.html – (Data zvernennia 07.07.2017). – Nazva z ekranu.
3. Bilynskyi Y. Y. Analiz metodiv i zasobiv vymiriuvannia hustyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynskyi, K. V. Ohorodnyk, N. A. Yaremishena // Naukovi pratsi VNTU. – Vinnytsia, 2016. – 13 s.
4. Bilynskyi Y. Y. Ultrazvukovyi metod ta zasib vymiriuvannia hustyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynskyi, K. V. Ohorodnyk, N. A. Stoian // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh». – Khmelnytskyi, 2017. – # 1. – S. 55–59.
5. Pat. 107963 Ukraina, MPK G01F 1/66. Prystrii vymiriuvannia hustyny naftoproduktiv / Y. Y. Bilynskyi, K. V. Ohorodnyk, N. A. Yaremishena. – # U 2016 00012 ; zaiavl. 04.01.2016 ; opubl. 24.06.2016, Biul. # 12, 2016 r.
6. Pat. 111788 Ukraina, MPK G01N 11/00. Ultrazvukovyi hustynomir / Y. Y. Bilynskyi, K. V. Ohorodnyk, N. A. Yaremishena. – # U 2016 04481 ; zaiavl. 22.04.2016 ; opubl. 25.11.2016, Biul. # 22, 2016 r.
7. Bessonov A. A. Vvedenye v laboratornыi praktykum po fyzyke / A. A. Bessonov, K.A. Derhobuzov [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://teachmen.ru/methods/phys_prac8.html – (Data zvernennia 20.05.2017). – Nazva z ekranu.
8. Kassandrov O. N. Obrabotka rezultatov nabliudenyi / O. N. Kassandrov, V. V. Lebedev. – M. : Nauka, 1970. – 200 s.

Рецензія/Peer review : 10.09.2017 р. Надрукована/Printed :20.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 004:519.816:614.4

С.М. ЗЛЕПКО, В.Е. КРИВОНОСОВ, С.В. ПАВЛОВ,
А.Ю. АЗАРХОВ, Д.М. БАРАНОВСКИЙ
Винницкий национальный технический университет

КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА КОМПЬЮТЕРНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОМОГРАФОВ ОТ НЕСТАБИЛЬНОСТИ И ПРОВАЛОВ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

К современным диагностическим аппаратам относятся ультразвуковые приборы, рентгеновские компьютерные томографы, магнитно-резонансные томографы и другое медицинское оборудование. До 14 % причин возникновения аварий и неработоспособности медоборудования связаны с аварийными, технологическими, профилактическими и другими отключениями в питающей сети, приводящими к её неполнофазным режимам, появлению коммутационных перенапряжений, несимметричным режимам и образованию кратковременных провалов напряжения. Проведены исследований режимов работы рентгеновского компьютерного томографа и анализ причин аварийного выхода из строя при провалах напряжений. Разработан режим мониторинга напряжений питающей сети, фазных токов; алгоритмы диагностики и защиты от несанкционированных отключений и провалов напряжения питающей сети и выявления ослабления контактных соединений токоведущих частей с прогнозированием времени работы в предаварийном режиме.

Ключевые слова: медоборудование, томограф, защита медоборудования, питающая сеть.

S.M. ZLEPKO, V.E. KRIVONOSOV, S.V. PAVLOV, A.U. AZARCHOV, D.M. BARANOVSKY
Vinnytsa National Technical University

COMPREHENSIVE PROTECTION OF COMPUTER X-RAY TOMOGRAPHS FROM INSTABILITY AND FREQUENCY VOLTAGE PROTECTIONS

Modern diagnostic devices include ultrasonic devices, X-ray computer tomographs, magnetic resonance tomographs and other medical equipment. Up to 14% of the causes of accidents and inoperability of medical equipment are associated with emergency, technological, preventive and other disconnections in the supply network, resulting in its incomplete phase regimes, the appearance of switching overvoltages, asymmetric regimes and the formation of short-term voltage dips. Studies of the operation modes of the X-ray computer tomograph and an analysis of the causes of the emergency failure during stress failures are carried out. The mode of monitoring of the mains voltage, phase currents is developed; algorithms for diagnostics and protection against unauthorized outages and failures of the supply network voltage and for detecting the attenuation of the contact connections of current-carrying parts with prediction of the operating time in the pre-emergency mode.

Keywords: medical equipment, scanner, protection of medical equipment, feeding network.

Одной из задач развития страны является повышение продолжительности жизни населения и продление трудовой, творческой и социальной деятельности людей. Совершенствование методик диагностирования болезней и их лечение не могут на сегодняшний день обойтись без современных диагностических аппаратов и комплексов. Развитие компьютерных технологий позволило создать высокоточные средства диагностирования болезней, выявлять их симптомы на более ранней стадии, своевременно назначать и проводить коррекцию лечения, сокращая тем самым, сроки выздоровления больных.

Современные диагностические аппараты являются сложными электромеханическими устройствами, насыщенными элементами автоматики, электроники и оптики. Неисправности, возникающие при работе аппарата, можно разделить на внешние, связанные с системой электроснабжения питающей сети, и внутренние, связанные с поломками блоков и элементов самих аппаратов [1].

Таблица 1

Статистические данные поломок и аварий медоборудования

№/№	Вид повреждения	Количество выхода из строя, %	Причина повреждения
1	Отсутствие напряжения питания	3–5	Повреждение силового и коммутационного оборудования, плановые и аварийные переключения в сети
2	Отсутствие тока в одной из фаз питания	5–7	Неполнофазный режим питающей сети, обрыв токоведущего соединения, ослабление контакта токоведущего соединения
3	Аварийное отключение и поломка инвертора	3–4	Провал напряжения в питающей сети длительностью менее 01 с.
4	Внутренние поломки и аварии	80–84	Не связанные с питающей сетью

Аварии, коммутационные переключения и неполадки в питающей сети могут быть причиной возникновения внутренней поломки диагностического оборудования или привести к получению

недостоверного результата обследования больного. Статистические данные причин отключения, простоя и прекращения исследования больных ультразвуковой, рентгеновской и магниторезонансной томографической аппаратурой приведены в табл. 1. Данные получены с использованием опыта эксплуатации и ремонтов медоборудования научно-производственного предприятия «НВП Инфотехмед» г. Тернополя.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что до 14 % причин возникновения аварий и неработоспособности медоборудования связаны с аварийными, технологическими, профилактическими и другими отключениями в питающей сети, приводящими к неполнофазным режимам сети, появлению коммутационных перенапряжений, несимметричным режимам и образованию кратковременным провалов напряжения. Особенно чувствительными устройствами к ним являются РКТ. Требования, предъявляемые к надежности и безопасности электроснабжения медицинских лабораторий, исследованы в [2]. Однако в работе [2] недостаточно рассмотрены вопросы защиты медицинского оборудования при возникновении анормальных режимов в питающей сети и токоведущих соединений. Одной из причин простоя оборудования является ослабление токоведущего соединения [3], что приводит к его перегреву, выгоранию соединения, повреждению коммутационной аппаратуры и коротким замыканиям в системе электроснабжения. В работах [4, 5] исследованы причины перегрева контактных соединений, предложены методы и устройства контроля контактного соединений токоведущих частей.

На сегодняшний день разработка единой комплексной системы мониторинга параметров сети, токов нагрузки, температурных показателей болтовых соединений токоведущих частей и защиты медоборудования, повышения безаварийной и достоверной работы РКТ является актуальной задачей, которая позволит медицинскому персоналу самостоятельно принимать решения о проведении обследования больного.

Задача

Проведение исследований режимов работы рентгеновского компьютерного томографа (РКТ). Анализ причин аварийного выхода из строя инвертора РКТ при провалах напряжений. Разработка режима мониторинга напряжения питающей сети, фазных токов РКТ; алгоритмов диагностики и защиты РКТ от несанкционированных отключений и провалов напряжения питающей сети и выявления ослабления контактных соединений токоведущих частей с прогнозированием времени работы в предаварийном режиме.

Изложение материала

Лаборатории или медицинские центры, в которых установлены диагностические медицинские аппараты, в частности рентгеновские компьютерные томографы (РКТ), получают питания как потребители электроснабжения третьей категории. Согласно [6], электроснабжение электроприемников третьей категории выполняется от одного источника питания при условии, что есть перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения.

Как правило, отключение питания производится без предупреждения, а коммутационные переключения силового оборудования приводят к провалам напряжения. Включение однофазных потребителей нагрузки ведет к появлению несимметрии напряжения питания. Требования к показателям качества электроэнергии (ПКЭ), поставляемой для питания электропотребителей, определены ГОСТ 10913-97 [7].

Основными ПКЭ являются: отклонение напряжения, несимметрия напряжений, отклонение частоты, несинусоидальность напряжения, колебание напряжения [7].

При определении значений некоторых показателей ПКЭ используют следующие вспомогательные параметры электрической энергии:

– частоту повторения изменений напряжения $F\Delta Ut$;
– интервал между изменениями напряжения $t\ i,\ i+1$;
– глубину провала напряжения δU_n;
– частота появления провалов напряжения F_n;
– длительность импульса по уровню 0,5 его амплитуды $\Delta t_{имп} 0,5$;
– длительность временного перенапряжения Δt пер U.

Провалы напряжения – внезапное снижение напряжения в системе электроснабжения с последующим его восстановлением до значения, находящегося в диапазоне допустимых значений в установившемся режиме работы энергосистемы. В табл. 2 приведены уровни и время провалов напряжений в системах электроснабжения [8].

Причинами несанкционированных отключений и провалов напряжения могут быть короткие замыкания в сети, технологические переключения нагрузок, грозовые разряды, срабатывание релейной защиты и т. д.

Комплексная защита РКТ основана на мониторинге линейных напряжения, фазных токов и температурных показаний соединений токоведущих частей. На рис. 1 приведена структурная схема устройства для защиты РКТ, в которой диагностируются состояние питающей сети и токоведущих элементов, прогнозируется время развития аварийных процессов, обеспечивается поддержание уровня напряжения на шинах питания РКТ более 10 мс, производится безаварийное отключение РКТ от сети при

выявлении аварийных режимов.

Таблица 2

Провалы и прерывания напряжения в электрических сетях [8]

Амплитуда, % U ном	Количество провалов и прерываний в год				
	Всего	В том числе длительностью, с			
		От 0,01 до < 0,10	От 0,10 до < 0,50	От 0,50 до < 1	От 1 до < 3
От 10 до 30	145	61	66	12	6
От 30 до 60	49	8	36	4	1
От 60 до 100	24	2	17	3	2
100	41	0	12	24	5
	259	71	131	43	14
	100%	27,4%	50,6%	16,6%	5,4%

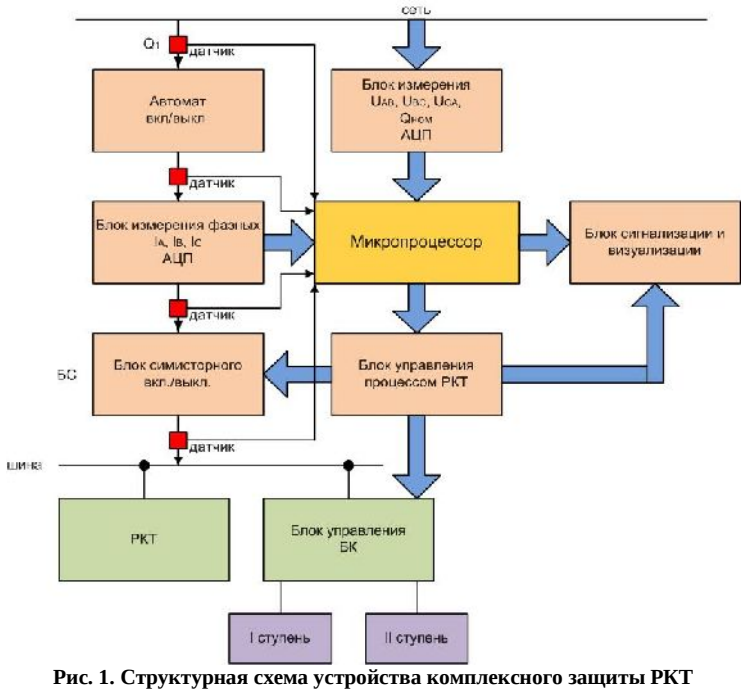


Рис. 1. Структурная схема устройства комплексного защиты РКТ

Измерения уровней линейных напряжений выявляют неполнофазный режим питающей сети, провал напряжения и несанкционированное отключение. Контроль фазных токов позволяет выявлять обрыв токоведущей части, управлять компенсационными устройствами, а при контроле температуры болтового соединения определять момент ослабления контакта и прогнозировать время развития аварии. Параллельно включенные батарей конденсаторов (БК) позволяют поддержать напряжения на шине РКТ за счет запасенной в них энергии. Использование твердотельных реле, БК и диагностирование причин снижения напряжения на одной из фаз позволяет проводить аварийное отключение РКТ при прохождении тока нагрузки нулевого значения.

Для корректного выбора параметров БК проведены исследования параметров сети и нагрузочных характеристик РКТ (марка «Alxion 16», фирма-изготовитель «Тошиба») с помощью аттестованного прибора «Флюк 435». На рис. 2–6 приведены диаграммы изменения напряжений, фазных токов, потребления активной (P), реактивной (Q) мощностей и коэффициента мощности cosα полного цикла работы РКТ в период обследования пациента.

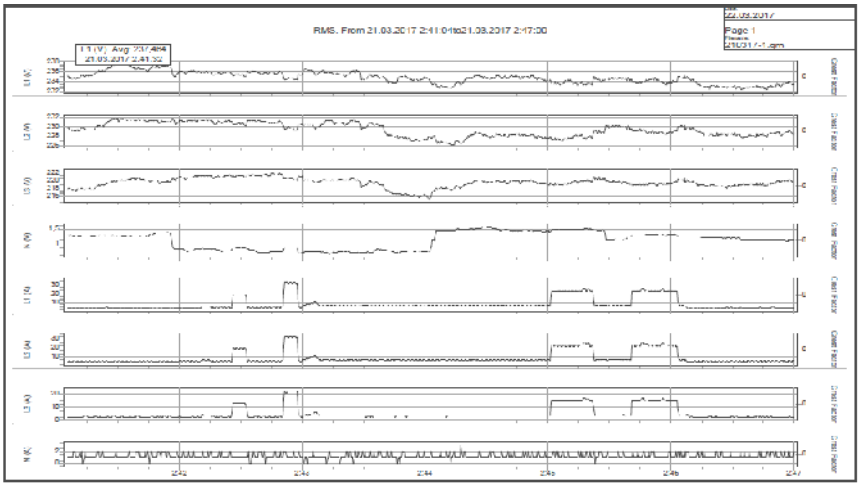


Рис. 2. Полный цикл обследования; график изменения напряжений и фазных токов

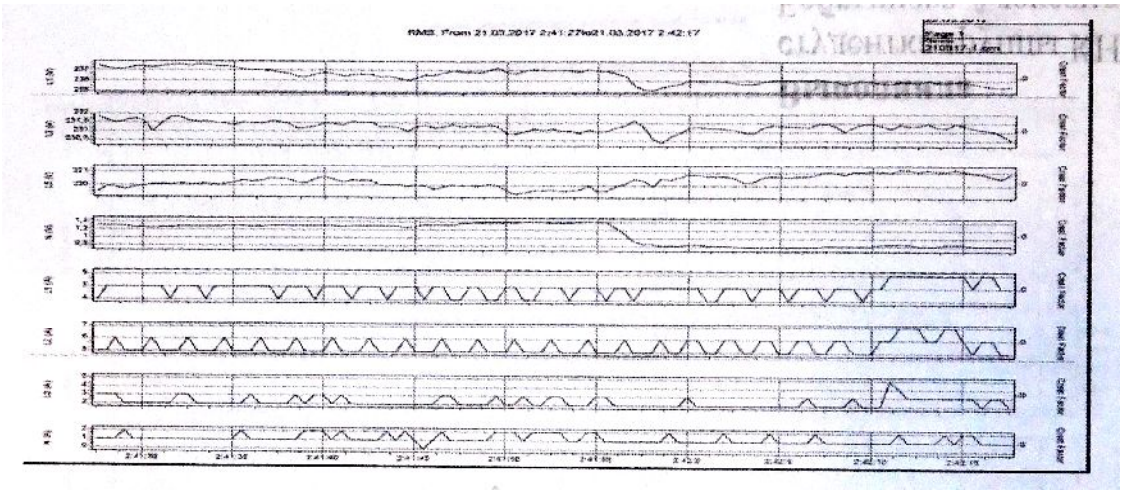


Рис. 3. Изменение напряжения и тока в фаза в подготовительном режим

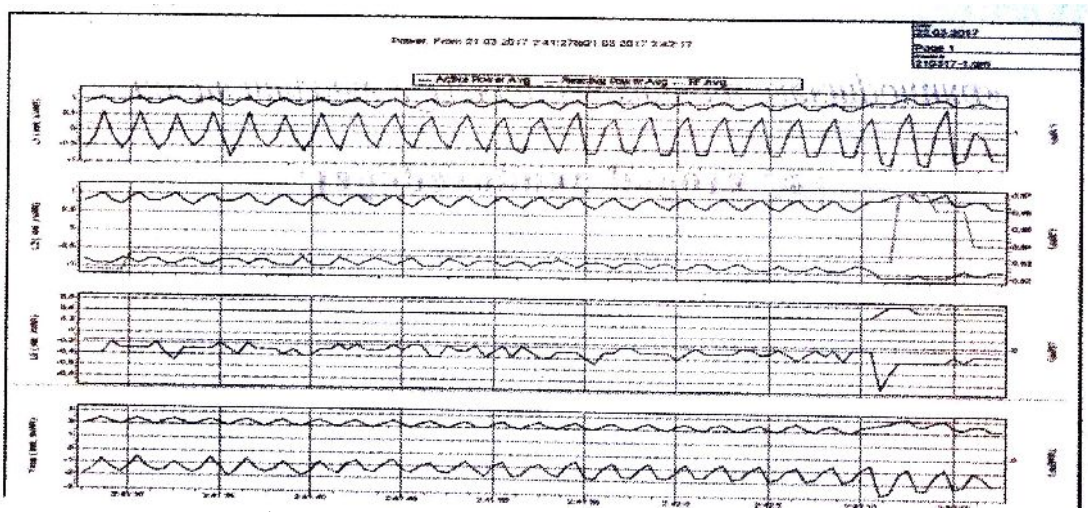


Рис. 4. Потребление активной и реактивной мощностей в подготовительном режиме

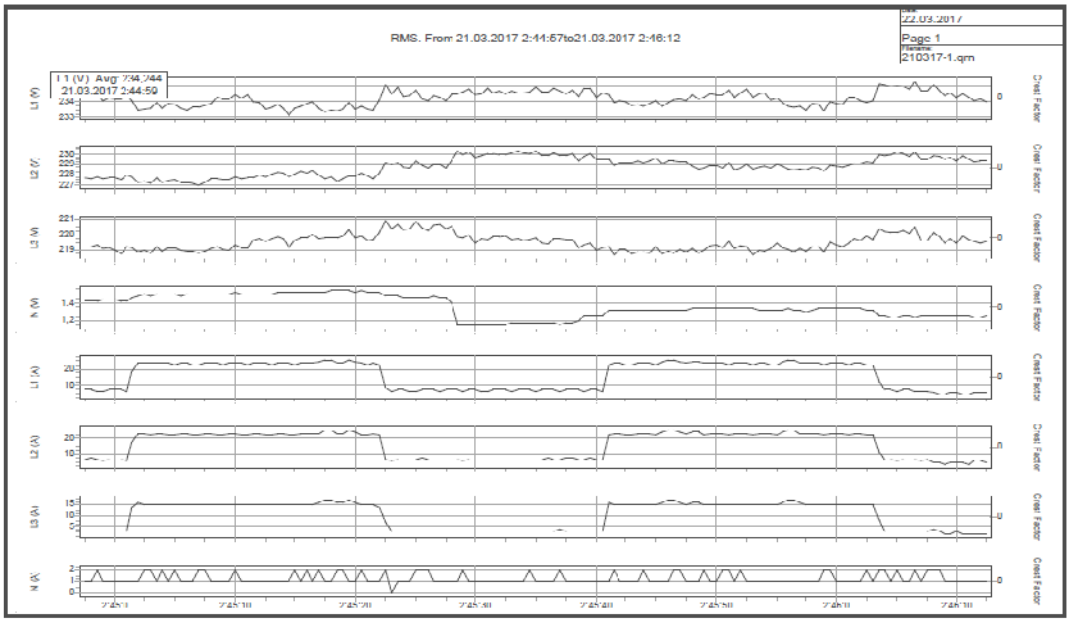


Рис. 5. Графики изменения фазных напряжений и токов в режиме полного обследования

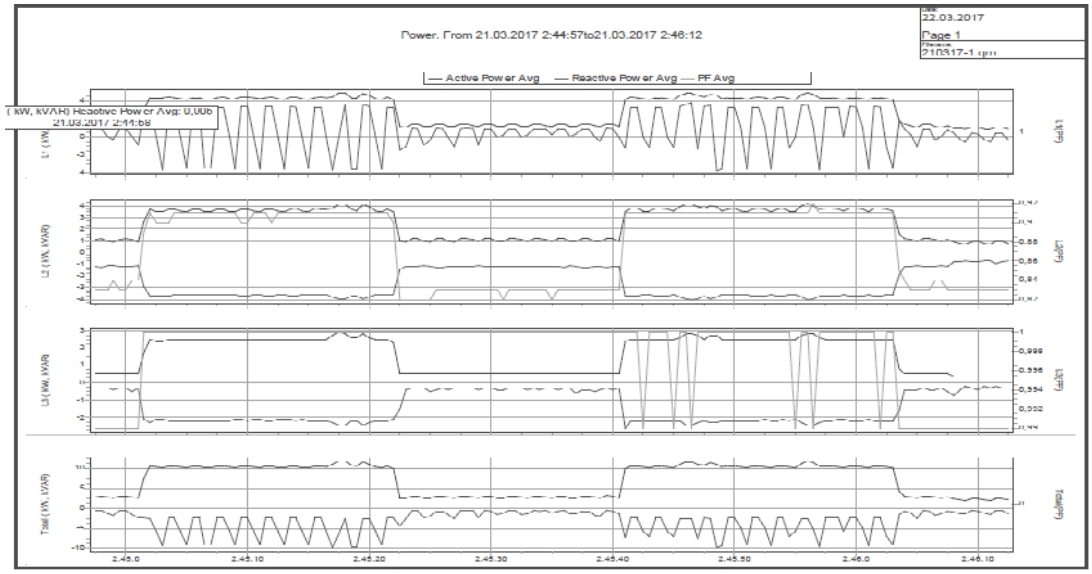


Рис. 6. Графики изменения активной и реактивной мощностей в режиме полного обследования

Отклонение напряжений фаз составило фаза А – ± 3В, фаза В + 10 В, фаза С +18 В; отклонение напряжения – ΔU – 8%, что в пределах нормы; коэффициент несимметрии $K_{нс}$ = 4,6, что является предельным значением. Для снижения коэффициента несимметрии предложено произвести коммутационные переключения однофазных нагрузок, что позволило достигнуть коэффициента несимметрии 1,8 – 2 %.

Основной причиной выхода из строя инвертора является высокое напряжения, появляющееся на инверторном блоке при провалах напряжений питающей сети. В аппаратах РКТ для проведения обследования требуется высокое, порядка 125 кВ, анодное напряжение [9]. Режим работы РКТ, (см. рис. 3) является циклическим и повторно-кратковременным, время обследования составляет от 7 до 25 минут.

Цикл обследования состоит из:

- подготовительного периода: величина тока составляет (5–8) % $I_н$ – номинального значения;
- предварительного обследования: время обследования составляет 3–6 минут; величина ток может составлять (30–60) % $I_н$;
- периода основного обследования: время обследования составляет 7–15 минут; величина ток может составлять (50–100)% $I_н$.

Во время обследований РКТ потребляет большую реактивную мощность (см. рис. 4), то есть элементы РКТ обладают большой величиной индуктивности – L. Если во время обследования происходит внезапное обесточивание индуктивности, возникает ЭДС (электродвижущей силы) самоиндукции, определяемой выражением [10]:

$$e = -L\frac{dl}{dt}.$$

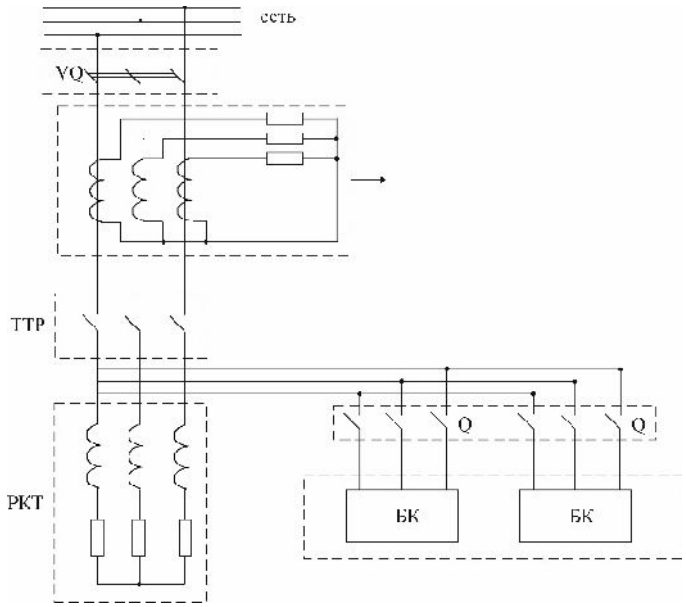


Рис. 7. Электрическая схема питания РКТ

Максимальная величина ЭДС возникает в момент прохождения одним из фазных токов пикового значения синусоиды. Перенапряжение, величина которого многократно превышает номинальное значение рабочего напряжения, является причиной выхода инвертора РКТ из строя.

Выбор числа ступеней и мощности каждой ступени БК зависит от величины потребляемого тока. На рис. 8 представлена принципиальная электрическая схема силовой части устройства с двумя ступенями включения БК.

Для РКТ, работающих с графиком нагрузки (см. рис. 1), мощность каждой ступени включения БК рассчитывается по величине коэффициента мощности – $cos\alpha_{ст}$, потребленной величине активной $P_{ст}$, реактивной $Q_{ст}$ мощности, периода в цикле обследования пациента. Выбор мощности БК осуществляется следующим образом.

Мощность БК определяется как:

$$Q_{бк} \geq Q_{ст} = \sqrt{S_{ст}^2 - P_{ст}^2}, \quad (1)$$

где $S_{ст} = \dfrac{P_{ст}}{\cos\alpha_{ст}}$ – полная потребленная мощность ступени РКТ.

Зависимость между мощностью конденсатора, кВар, и емкостью, мкФ:

$$Q_{ст} = 2\pi C U^2 \cdot 10^9, \quad (2)$$

$$C = \frac{Q_{БК} \cdot 10^9}{2\pi f U^2} \quad (3)$$

где C – емкость конденсатора;
$Q_{БК}$ – мощность конденсатора;
f – частота сети;
U – напряжение сети.

Определим емкости для каждого режима работы РКТ.

Для подготовительного режима $S_{ст} = \sqrt{2,2^2 + 2^2} = 3\,кВа$, $cos\alpha_{ст}$ = 0,73, $Q_{БК}$ = 2 кВар, C = 133 мкф.

В табл. 3 приведены мощности и значения емкости каждой ступени.

Таблица 3

Мощности и значения емкости ступеней

№	Наименование режима	Напряжение фазы U-В	Реактивная мощность БК фазы, кВар	Емкость БК фазы, мкф
1	Подготовительный режим	220	2,1	131
2	Режим предварительного обследования	220	3	197
3	Режим полного обследования, (от глубины облучения)	220	10,2-50	670-3290

Время протекания переходного процесса и затухание напряжения на шине РКТ зависит от электрических параметров оборудования.

Несанкционированные отключения напряжения питания или их провал приведут к разряду БК на индуктивное и активное сопротивления РКТ. Уравнение цепи для упрощенной схемы, представленной на рис. 9, имеет вид:

$$E = IR - U_{БК} \quad (4)$$

где $E = -L\dfrac{dI}{dt}$ (здесь L – индуктивность обмотки; $U_{БК} = -\dfrac{1}{C_{БК}}\int Idt = 0$).

После подстановки имеем:

$$-L\frac{dI}{dt} - IR - \frac{1}{C_{БК}}\int Idt = 0. \quad (5)$$

Производная от левой и правой частей уравнения представляется дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L}\frac{dI}{dt} = 0. \quad (6)$$

Решение дифференциального уравнения (6) представлено формулой:

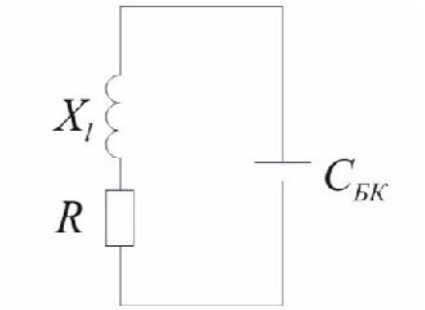


Рис. 8. Упрощенная схема замещения

$$i = \frac{U}{2L\gamma} e^{P_1 t} + \frac{U}{2L\gamma} e^{P_2 t}, \tag{7}$$

где $\gamma = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}}$; $P_{1,2} = -\frac{R_Д}{2L} \mp \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}}$.

Характер переходного процесса в цепи зависит от соотношения параметров элементов R, $C_{БК}$, L. При соотношении $\frac{1}{C_{БК}L} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2$ переходной процесс в цепи носит апериодический характер. Скорость изменения напряжения $U_{БК}$ зависит от величины R – активного сопротивления. На рис. 8 представлены результаты математического моделирования разряда БК для прогревочного периода.

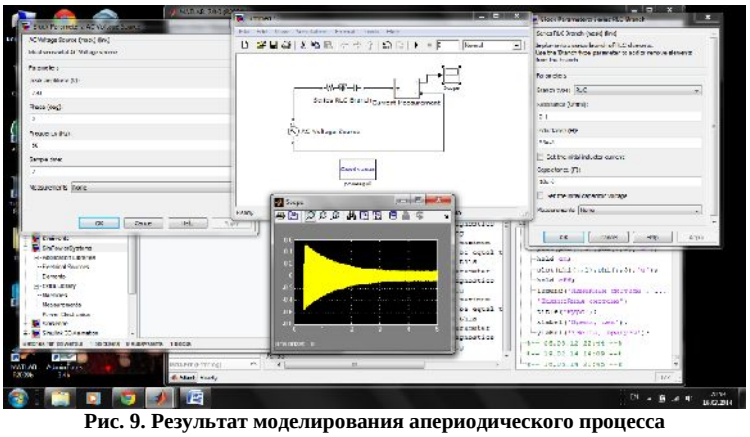


Рис. 9. Результат моделирования апериодического процесса

При $\frac{1}{C_{БК}L} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2$ корни характеристического выражения оказываются комплексными, коэффициент $\gamma = \sqrt{\frac{1}{C_{БК}L} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$.

Характер переходного процесса становится периодическим. На рис. 10 представлен периодический затухающий процесс разряда конденсатора, который соответствует предварительному и полному обследованиям.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC_{БК}} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \tag{8}$$

В табл. 4 Приведены результаты расчета времени затухания напряжения на шинах РКТ для различных значений cosα. Расчет проведен для случая 100 % загрузки РКТ; потребляемая активная мощность равна 51,1 кВт, cosα – 0,73, индуктивность L = 0,03 Гн, R = 3,26 Ом.

Таблица 4

Результаты расчета времени затухания напряжения на шинах РКТ

№/№	Значение $\cos\alpha$	Мощность БК, кВар	Емкость БК, мкф	Время затухания, мс
1	0,9	46,0	3027,0	70,0
2	1,0	47,84	3147,0	71,8
3	1,07	55,0	3619,0	79,3
4	1,1	56,3	3705,0	83,0
5	1,2	61,44	4042,2	86,0
6	1,25	64,1	4211,4	89,1

При 50 % загрузки РКТ, когда активная мощность равна 25 кВт, время затухания составляет 46 мс.

Подключение БК параллельно РКТ в режимах обследования позволяет компенсировать потребленную реактивную мощность и обеспечить задержку снижения напряжения от 45 мс до 90 мс. Для диагностирования причины снижения напряжения достаточно 5 мс.

Измерения температурных параметров и величин токов, протекающих в болтовых соединениях, позволяют определить начало ослабления его контакта [11, 12].

Постоянная нагрева болтового соединения является конструктивной константой, а ее изменение – причиной ослабления контакта и увеличения переходного сопротивления $R_{пре}$ или увеличении силы тока, протекающего в соединении.

Для расчета температуры токоведущего соединения при изменяющейся токовой нагрузке используется тепловая модель, которая описывается уравнением нагрева для однородного тела:

$$\Delta P dt = \alpha F \Delta\theta dt + cGd\theta \tag{9}$$

где $\Delta P = I^2 R_c$ – потери мощности, выделяемые в болтовом соединении при протекании тока I и имеющие суммарное сопротивление шин и переходного сопротивления контакта R;

dt – время протекания процесса;

a – коэффициент теплопередачи;

F – площадь поверхности болтового соединения;

c – удельная теплоемкость материала, из которого выполнено болтовое соединение;

G – масса болтового соединения;

$\Delta\theta$ – превышение температуры болтового соединения над температурой окружающей среды.

Решением уравнения (9) при неизменной силе тока, протекающего в болтовом соединении, является:

$$\theta = \theta_y - (\theta_y - \theta_{нач})e^{-t/\tau} \tag{10}$$

где θ_y – температура болтового соединения в установившемся режиме;

$\theta_{нач}$ – температура болтового соединения в начале режима;

τ – постоянная нагрева болтового соединения.

Если температура болтового соединения и окружающей среды одинаковы, то уравнение нагрева имеет вид:

$$\theta = \theta_y (1 - e^{-t/\tau}) \tag{11}$$

Постоянная нагрева τ представляет собой время, в течении которого болтовое соединение с теплопроводностью с и массой G нагревается до температуры $\theta_{нач}$ при отсутствии рассеяния теплоты с его поверхности. Постоянная нагрева является конструктивной константой данного болтового соединения, которую можно определить по справочным данным и параметрам болтового соединения, как:

$$\tau = \frac{cG\Delta\theta_y}{\Delta P} \quad \text{или} \quad \tau = \frac{cG\Delta\theta_y}{I^2 Rc} \tag{12}$$

где $R_c = R_к + R_{пр}$ – суммарное сопротивление контактов и переходного сопротивления соединения.

Решением уравнения для определении времени нагрева до температуры θ_y является выражение:

$$t = \tau \ln \frac{\theta_y - \theta_{нач}}{\theta_y - \theta} \tag{13}$$

Прогнозирование времени развития аварий, произошедших по причине ослабления контактного соединения, основано на знании величины постоянной нагрева исправного соединения, определяемой выражением (12) и величины тока, протекающего в соединении. Величина температуры, до которой нагреется болтовое соединение, определяется выражением (10). Полученная величина температуры сравнивается с измеренной температурой данного болтового соединения. По разности температур определяется исправность болтового соединения. Если постоянная нагрева изменилась, вычисляется прогнозируемое время достижения соединения критической температуры, то есть время развития аварии.

Полученные данные о состоянии питающей сети и токоведущих соединений, как до включения РКТ, так и вовремя его работы, позволяют расширить функции врача, проводящего обследования,

своевременно принимать решения о проведении обследования и знать причины, приведшие к аварийной ситуации.

На рис. 12 приведена блок-схема алгоритма работы устройства комплексной защиты РКТ.

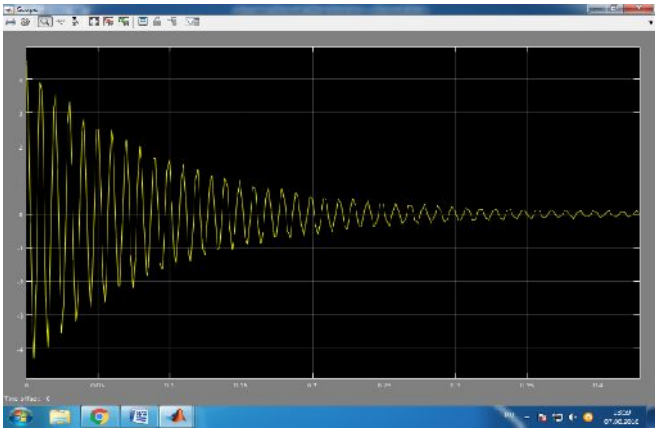
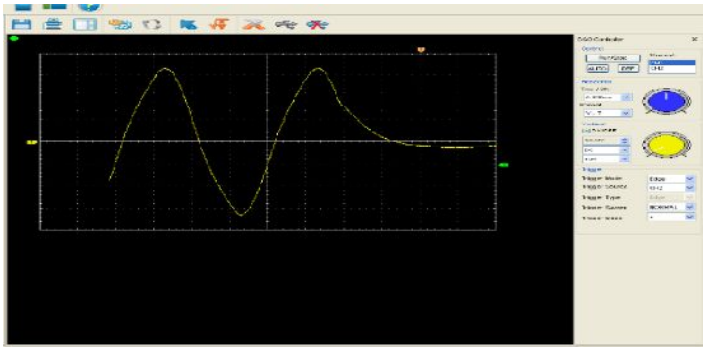
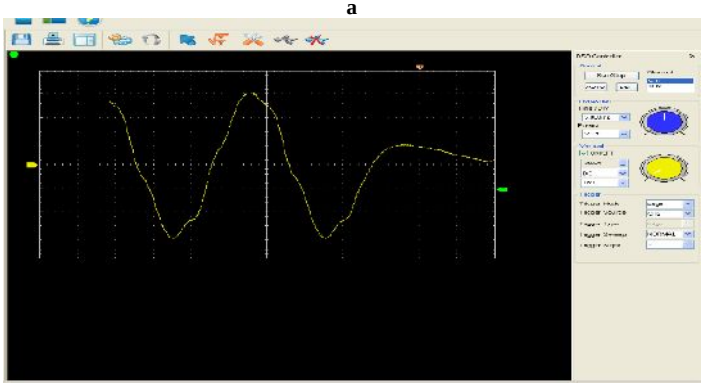


Рис. 10. Результат моделирования периодического процесса

На физической модели проведено моделирование процесса разряда конденсаторов для различных значений cos*α* (рис. 12)



а



б

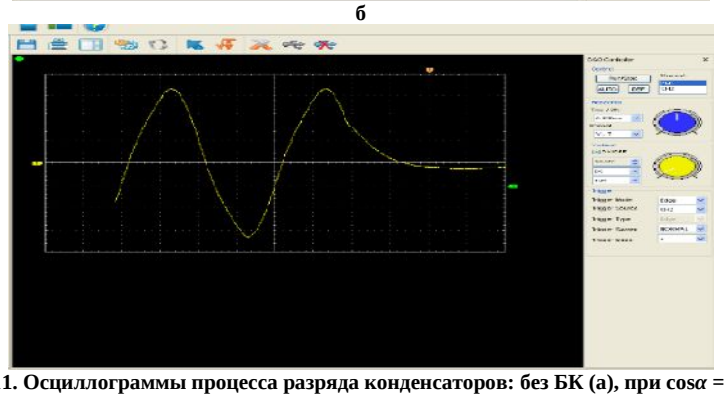


Рис. 11. Осциллограммы процесса разряда конденсаторов: без БК (а), при cos*α* = 1 (б), при cos*α* = – 0,82 (в)

Расчет времени протекания процесса затухания *T*, определяется согласно источнику [10] выражением:

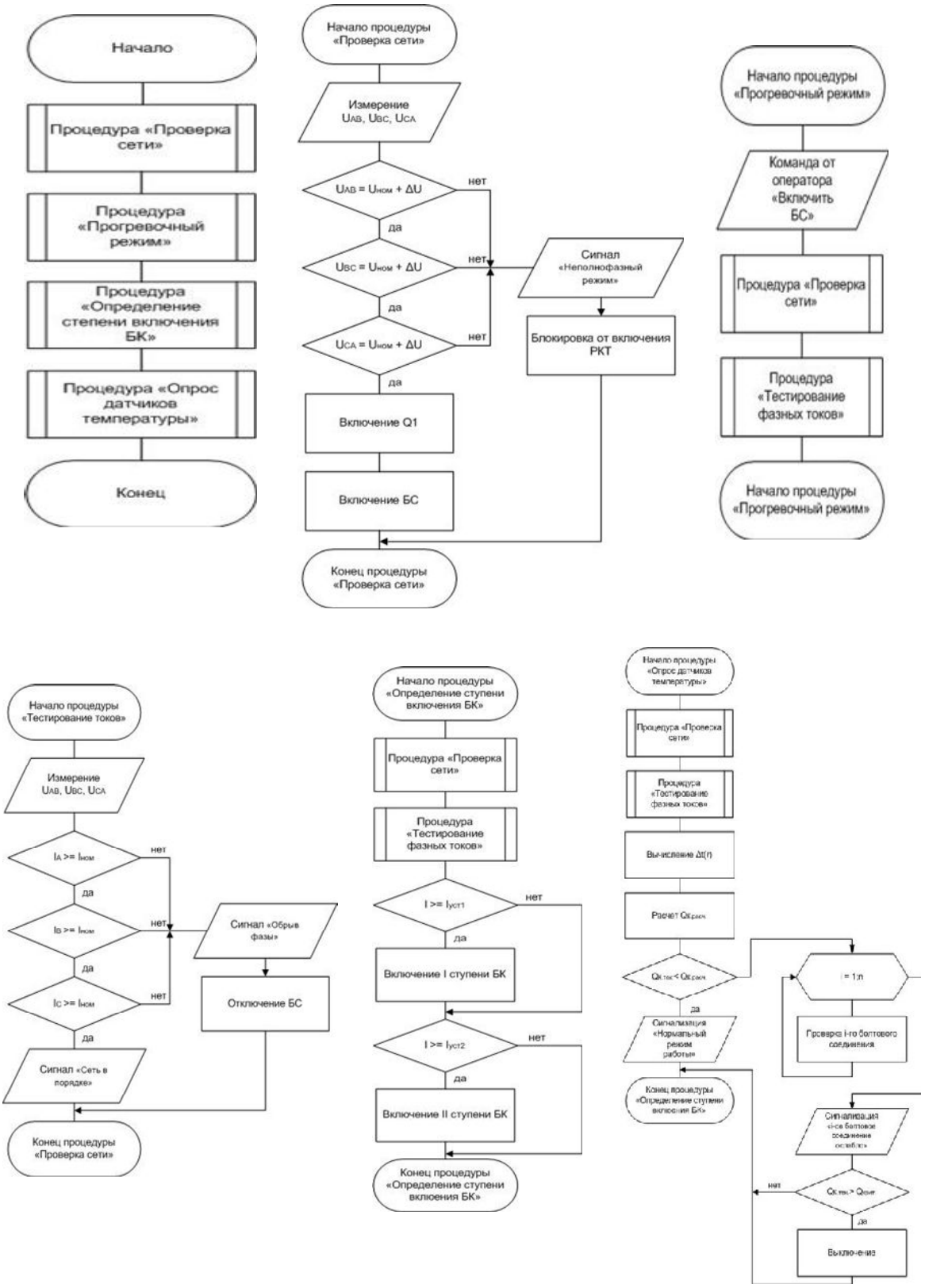


Рис. 13. Блок-схема алгоритма работы устройства комплексной защиты РКТ

Выводы:

1. Неполнофазные режимы напряжений и их, провалы, обрывы в токоведущих соединения являются причинами возникновения внутренних перенапряжений РКТ, приводящих к поломке инвертора.

2. Мониторинг напряжений питающей сети, токов нагрузки и температур токоведущих соединений позволяет диагностировать причины внезапного снижения напряжения на шинах РКТ.

3. Применение параллельно включенных РКТ батарей конденсаторов и твердотельных включателей позволяет получить временную задержку падения напряжения на клеммах питания РКТ до 90 мс, провести диагностику и безаварийное отключение РКТ при прохождении фазового тока нулевого значения.

4. Одновременный контроль токов нагрузки и температур болтовых соединений позволяет определить момент ослабления контакта и прогнозировать время достижения критического значения температуры контакта.

5. Получение врачом достоверной информации о состоянии элементов системы электроснабжения оборудования позволяет правильно принять решение по алгоритму обследования больного.

Литература

1. Неисправности в рентгеновских компьютерных томографах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ags-etalgroup.ru/publ/rentgenotekhnika/ obnaruzhenie_ defektov_remont_rentgenovskikh_apparatov/26-1 -0-400.
2. Системы электроснабжения медицинских помещений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://energolider.com/ua\articla-show\l 39htnl/.
3. Пищур А. Коммутационное оборудование / А. Пищур, С. Ефивовых // Новости электротехники. – № 5 (77). – С. 17–24.
4. Кривоносов В. Е. Критерий диагностики винтовых соединений в ультразвуковой томографической аппаратуре / В. Е. Кривоносов, С. М. Злепко // Вестник Хмельницкого национального университета. – 2017. – № 1. – С. 16–22.
5. Патент RU № 2408120, H02H5/04, 2009.
6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. 25.07.06 № 258 / Мин-во топлива и энергетики Украины. – Х. : Издательство: «Индустрия», 2007. – 288 с.
7. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электроэнергии» и европейски 1 стандарт EN50160 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://lcert.ru/novosti/vveden-novyy- standart-kachestva-elektroenergii-gost-r-54149.
8. Провалы напряжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://rza.org.ua/glossary/read/Proval-naprjazhenija.htm
9. Устройство рентгеновского компьютерного томографа [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://rudocs.exdat.com/docs/index-67135.html.
10. Электротехника / [Ю. М. Борисов и др.]. – М. : Электроатомиздат, 1985. – 552 с.
11. Патент України № 107749 Спосіб контролю за станом болтових з’єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням / Кривоносов В. Э. – Опубл. 10.02.2015.

References

1. Neyspravnosty v renthenovskykh kompiuternykh tomohrafakh [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : http://agsetalgroup.ru/publ/rentgenotekhnika/obnaruzhenie_defektov_remont_rentgenovskikh_apparatov/26-1 -0-400.
2. Systemy elektrosnabzhenyia medytsynskykh pomeshchenyi [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : http://energolider.com/ua\articla-show\l 39htnl/.
3. Pyshchur A. Kommutatsyonnoe oborudovanye / A. Pyshchur, S. Efyvovykh // Novosty elektrotekhnyky. – # 5 (77). – S. 17–24.
4. Kryvonosov V. E. Kryteryi dyahnostyky vyntovykh soedynenyi v ultrazvukovoi tomohrafycheskoi apparature / V. E. Kryvonosov, S. M. Zlepko // Herald of Khmelnytsky National University. – 2017. – # 1. – S. 16–22.
5. Patent RU # 2408120, N02N5/04, 2009.
6. Pravyla tekhnycheskoi ekspluatatsyy elektroustanovok potrebytelei : utv. 25.07.06 # 258 / Myn-vo toplyva y enerhetyky Ukrayny. – X. : Yzdatelstvo: «Yndustryia», 2007. – 288 s.
7. HOST 13109-97 «Normy kachestva elektroenerhyy» y evropeisky 1 standart EN50160 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : https://lcert.ru/novosti/vveden-novyy- standart-kachestva-elektroenergii-gost-r-54149.
8. Provaly napriazhenyia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : http://rza.org.ua/glossary/read/Proval-naprjazhenija.htm
9. Ustroistvo renthenovskoho kompiuternoho tomohrafa [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : http://rudocs.exdat.com/docs/index-67135.html.
10. Elektrotekhnyka / [Yu. M. Borysov y dr.]. – M. : Эlektroatomyzdat, 1985. – 552 s.
11. Patent Ukrainy # 107749 Sposib kontroliu za stanom boltovykh ziednan elektroobladnannia, shcho pratsiuie zi zminnym navantazhenniam / Kryvonosov V. Э. – Opubl. 10.02.2015.

Рецензія/Peer review : 23.09.2017 р. Надрукована/Printed :02.11.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 004.9

Л.О. ДУБЧАК, С.О. ВЕРБОВИЙ, О.М. БЕРЕЗЬКИЙ, Н.Я. САВКА
Тернопільський національний економічний університет
Т.В. ДАЦКО
Тернопільський державний медичний університет ім. І.Я. Горбачевського

НЕЧІТКА СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ПАТОЛОГІЧНИХ СТАНІВ МОЛОЧНОЇ ЗАЛОЗИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЦИТОЛОГІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

В даній статті розроблено нечітку систему обробки цитологічних зображень тканин молочної залози для діагностування патологічних станів. Моделювання роботи запропонованої системи підтвердило її працездатність та можливість застосування в медичній практиці з метою уникнення суб'єктивних суджень лікаря-діагноста.

Ключові слова: цитологія, патологічні стани молочної залози, нечітка система, Matlab, телемедицина.

L.O. DUBCHAK, S.O. VERBOVYY, O.M. BEREZSKY, N.Y. SAVKA
Ternopil National Economical University
T.V. DATSKO
I. Gorbachevsky Ternopil State Medical University

FUZZY DIAGNOSTIC SYSTEM OF PATHOLOGICAL CONDITIONS OF BREAST BASED ON THE CYTOLOGICAL ANALYSIS OF IMAGES

Accurate and reliable decision in oncology prognosis can help plan further optimal surgery and therapy. The basis for the diagnosis in the breast pathological conditions is the processing of histological and cytological images. The main role in most modern medical systems of the images analysis is based on the subjective opinion of doctor-diagnostician. Therefore, there is a necessity of development of the diagnostic system, which can work in real-time and able to untie the indicated task of subjectivity. In this article the fuzzy system for treating cytological images of breast for the diagnosis of pathological conditions developed. This system bases on Mamdani mechanism of fuzzy conclusion. The inputs of such system are the image features and the output is diagnosis of the pathology state. In this article the analyzes of the cytological images of the breast tissues had been done and the main features of the pathological states of the cytological and histological images identified, the fuzzy knowledge base for diagnosis developed, the fuzzy system created and implemented in the Matlab environment. The simulation of the proposed system confirmed its ability to work and the possibility of its application in medical practice in order to avoid subjective judgments of the diagnostic doctor. Moreover, the noted fuzzy system can be used for questionable diagnoses as confirmation of expert opinion. Hardware or software realization of the proposed fuzzy system of the diagnostic can be used in oncology telemedicine as additional means of confirmation of diagnosis.

Keywords: cytology, pathological conditions of the mammary gland, fuzzy system, Matlab, telemedicine.

Вступ

Точне і надійне прийняття рішень в онкологічному прогнозі може допомогти у плануванні подальшої оптимальної хірургії та терапії. Основою для постановки діагнозу при патологічних станах тканин є обробка гістологічних та цитологічних зображень.

Під час роботи з цитологічними зображеннями у лікаря-діагноста може виникнути ряд проблем, наприклад:

- зображення деяких фрагментів може бути розмитим через недостатню точність апаратури;
- лікар може бути невпевненим у наявності певної ознаки на зображенні;
- недостатній досвід лікаря-діагноста для постановки остаточного діагнозу.

Застосування простих інженерних чи програмних рішень для компенсування цих недоліків не можливе через нечіткість вхідних даних для діагностування. Саме тому застосування нечіткої логіки є сучасним доступним методом, що дозволяє будувати системи для опрацювання якісної інформації, що працюють в режимі реального часу і легко переналаштовуються.

Медична обробка зображень, моніторинг та контроль анестезії, обробка сигналів ЕКГ та ЕЕГ – це тільки деякі сучасні області використання апарату нечіткої логіки в медицині.

В онкології нечітка логіка, як правило в поєднанні з нейронними мережами, застосовується в основному для обробки самих зображень або деяких маркерів виникнення патологічних станів. Наприклад, Альберто д'Онофріо в своїй роботі з застосування нечіткої логіки в медицині під час дослідження впливу хіміотерапії вказує, що хоча нечітка система має свої недоліки, проте її результат є біологічно реалістичнішим в порівнянні з іншими підходами [1].

Застосування нейро-нечіткого підходу до побудови системи опрацювання маркерів виникнення онкологічних станів молочної залози та простати надано у роботі [2]. Автори довели його працездатність та високу ймовірність отриманих результатів.

Група науковців Державного університету Луїзіани також досліджували застосування нечіткої логіки з метою виключення суб'єктивності прийняття рішень радіологами під час застосування термінів та лексики діагностики раку молочної залози [4].

Інша сфера застосування нечіткої логіки – це обробка медичних зображень тканин різних органів. Основна перевага такого підходу – це швидке навчання системи та висока вірогідність результатів [3, 5].

Проте сучасні дослідження в основному потребують адміністрування інженера та не спрямовані на уникнення суб'єктивності суджень лікаря-діагноста під час постановки діагнозу.

Метою даної статті є розробка нечіткої системи постановки діагнозу патологічних станів молочної залози на основі цитологічних зображень, що може застосовуватися лікарями для підтвердження правильності їх діагностування.

Для цього необхідно вирішити наступні задачі:

1) провести аналіз цитологічних зображень тканин молочної залози та виділити основні ознаки патологічних станів бази даних цитологічних та гістологічних зображень [11];

2) розробити нечітку базу знань для постановки діагнозу;

3) побудувати нечітку систему і здійснити її реалізацію та дослідження.

Аналіз цитологічних зображень патологічних станів молочної залози

Цитологічне дослідження епітеліальних клітин і структур, які вони утворюють, дозволяє зробити висновок про ступінь проліферації епітелію. Поява в цитограмі ущільненого, апокринового епітелію, сосочкоподібних розростань на фоні характерному для формування в органі порожнини або ознак різкої секреторної функції клітин дозволяє цитологічно диференціювати кістозну мастопатію і внутрішньопротокову папілому від фіброаденоми та аденоми. Систематизація цитологічних зображень при мастопатії та фіброаденомах показує можливість цитологічного методу у встановленні висновку (діагнозу).

В препаратах спостерігаються епітеліальні клітини відносно не великого розміру, по будові схожі з клітинами епітелію, альвеол і залозистих трубок не зміненої молочної залози. Проте, основними ознаками, характерними для дольової непроліферативної мастопатії виявлено наявність сплощеного апокринового епітелію з округлими гіперхромними ядрами, ознаками секреторної активності в клітинах та формуванням сосочкоподібних структур [10].

Ознакою проліферації клітин можуть служити зміни морфологічних властивостей клітин або поява незвичних для незміненого органу багатоклітинних епітеліальних структур. До клітинних критеріїв проліферації слід віднести зменшення розмірів клітин і їх ядер. В таких випадках переважають округлі або злегка овальні (якби набухлі) ядра з чітко визначеним ніжно петлистим інтенсивно пофарбованим хроматином. В окремих ядрах можуть визначатися поодинокі, відносно не великі, інтенсивно пофарбовані ядерця. Цитоплазма, переважної більшості клітин, пофарбована в інтенсивно голубі тони, іноді в бузкові або сині. Клітинні комплекси характеризують проліферацію, мають вигляд округлих утворень, подібних до первинних залозистих структур (ацинусів) без сформованих у них просвітів. Зустрічаються також сосочкоподібні комплекси із щільним розташуванням клітин в багатошарові пласти. Якщо у патологічному вогнищі переважає фіброз, то в цитологічних препаратах виявляється мале число мілких, мономорфних клітин з однорідними круглими гіперхромними ядрами і ледве помітним вузьким обідком інтенсивно пофарбованої цитоплазми.

При кістозній мастопатії з апокринізацією епітелію в пунктаті виявляються клітини у стані секреції, які на загальному фоні препарату виділяються великими розмірами і своєрідною структурою цитоплазми. Вони можуть бути різної форми, проте, переважають високі призматичні і неправильно округлі клітини. Ядра їх округлі з чітким мілко петлистим рисунком хроматину іноді із збільшеними ядерцями. Цитоплазма всіх клітин насичена, і як правило, нерівномірно пофарбована з виявленням двох зон (базальної та апікальної). Апікальна частина клітин не рідко містить пилевидні гранули секрету, а іноді зернистість виявляється і в базальній зоні. Якщо клітин в препараті багато є можливість прослідкувати різні етапи апокринової секреції, аж до відшарування апікальної частини клітини. Фон препаратів складають фрагменти цитоплазми.

Цитограма непроліферативної мастопатії представлена на рисунку 1.

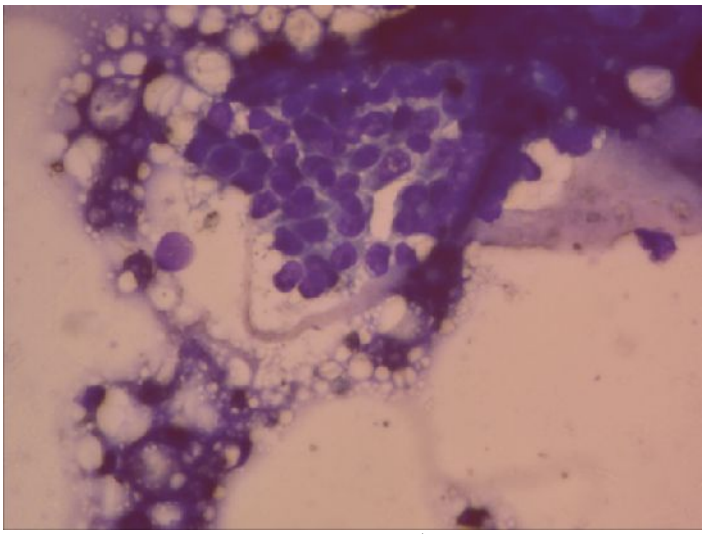


Рис. 1. Цитограма. Непроліферативна мастопатія. Забарвлення за Романовським-Гімза × 200

Якісні ознаки діагностування непроліферативної мастопатії:

1) сплощений апокриновий епітелій;
2) формування сосочкових структур;
3) наявність секреторної активності в клітинах;
4) округлі гіперхромні ядра, розташовані центрально;
5) не велика кількість гіперхромних мономорфних клітин;
6) клітини розташовані пластами;
7) у фоні багато фагоцитів та гістіоцитів;
8) наявність секрету в навколо клітинному просторі.

Графічне відображення ознак на представлено на рис. 2.

Рис. 2. Відображення експертних ознак діагностування непроліферативної мастопатії

Правило діагностування непроліферативної мастопатії:

ЯКЩО сплощений апокриновий епітелій формування сосочкових структур І наявність секреторної активності в клітинах І округлі гіперхромні ядра, розташовані центрально І не велика кількість гіперхромних мономорфних клітин І клітини розташовані пластами І у фоні багато фагоцитів та гістіоцитів І наявність секрету в навколо клітинному просторі ТО непроліферативна мастопатія.

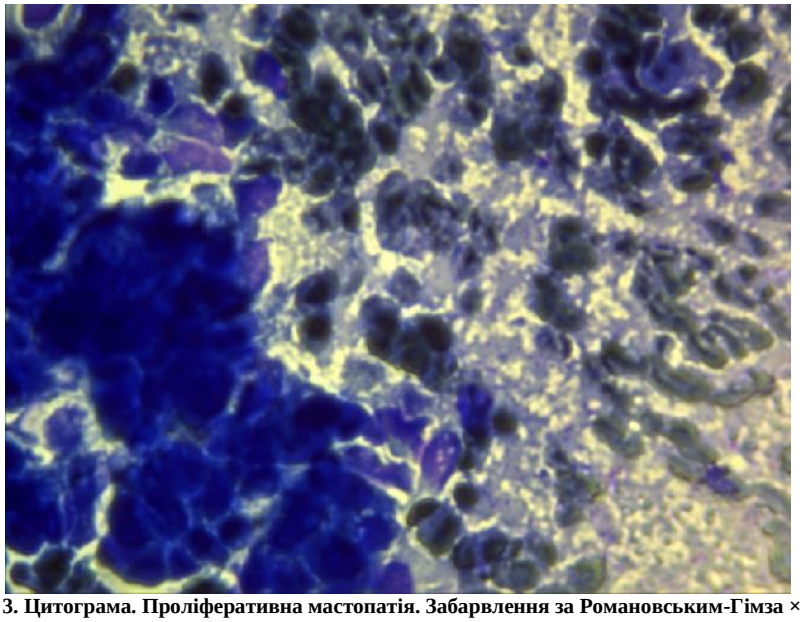


Рис. 3. Цитограма. Проліферативна мастопатія. Забарвлення за Романовським-Гімза × 200

Для цитологічної діагностики передракової проліферації епітелію на фоні мастопатії або фіброаденоми необхідна присутність в препараті окремих, різко збільшених епітеліальних клітин з ознаками атипії. Розміри великих атипових клітин можуть бути досить значними. Такі клітини відрізняються інтенсивністю пофарбування ядер та цитоплазми. В цей же час контури ядер залишаються рівними, чіткими іноді хвилястими, іноді із вдавленнями. Хроматин ядер рівномірний, глибчатий або петлистий, компактний інтенстивно пофарбований. Частою ознакою атиповості описаних клітин є значне збільшення показника ядерно-цитоплазматичного співвідношення. Передракова проліферація епітелію стінки кістозної порожнини

може супроводжуватись появою настільки атипових клітинних форм, що виникає необхідність диференціювати подібні цитограми з цитограмами раку. Відсутність глибчатості хроматину, нерівності контурів ядер і різко збільшених ядерець в сплощених клітинах свідчить про передраковий процес. Для передракової проліферації епітелію властива поява багатоклітинних структур у вигляді масивних округлих комплексів або папілярних структур з хаотичним розташуванням клітин кубічного або призматичного епітелію, багатошарових пластів сплощеного епітелію з наявністю двоядерних клітин (рис. 3).

Якісні ознаки діагностування проліферативної мастопатії:

1) формування клітинних комплексів (ацинусів);

2) формування сосочко подібних комплексів із щільним розташуванням клітин в багатошарові пласти;

3) великі розміри клітин;

4) великі розміри ядер з інтенсивно вираженим хроматином.

Графічне відображення ознак на представлено на рис. 4.

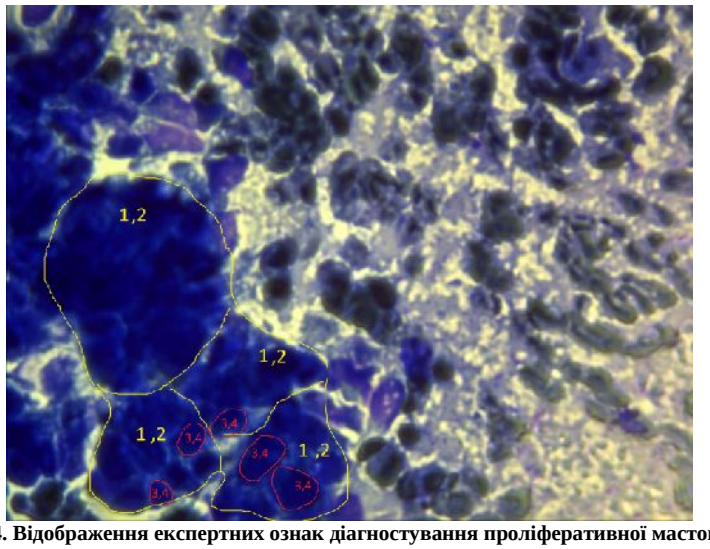


Рис. 4. Відображення експертних ознак діагностування проліферативної мастопатії

Правило діагностування непроліферативної мастопатії:

ЯКЩО формування клітинних комплексів (ацинусів) І формування сосочкоподібних комплексів із щільним розташуванням клітин в багатошарові пласти І великі розміри клітин І великі розміри ядер з інтенсивно вираженим хроматином ТО проліферативна мастопатія.

Листовидні пухлини молочної залози (клітинна інтраканалікулярна фіброаденома, проліферуюча фіброаденома) являють собою доброякісні пухлини з активним розмноженням клітинних елементів строми з ознаками міксоматозу та гіалінозу. З клінічної та морфологічної точки зору листовидні пухлини рядом авторів розцінюються як новоутворення, які займають проміжне місце між інтраканалікулярними фіброаденомами та саркомами молочної залози. Розрізняються так звані «класичні» листовидні пухлини без атипії клітин строми та передсаркоматозні, які характеризуються проліферацією фіброцитів та фібробластів, наявністю ділянок хрящової, кісткової, жирової і судинної тканини, атипією окремих клітин. Епітеліальний компонент пухлини зазвичай представлений помірно проліферуючими епітеліально-тканинними компонентами. При листовидній пухлині без атипії елементів строми цитологічно виявляється велика кількість клітин з переважанням сполучно-клітинних або епітеліальних клітин. Фон препарату зазвичай складають оксифільні дрібнозернисті або тяжисті маси. Більшість клітин строми схожі з фібробластами та фіброцитами і розташовуються розрізнено, в групах, а іноді тяжами (рис. 5).

Ознаки діагностування фіброаденоми:

1) формування сосочкових структур;

2) сплощений апокриновий епітелій;

3) збільшенні в розмірах клітини;

4) інтенсивно вираженні ядра;

5) вузький обідок інтенсивно пофарбованої цитоплазми;

6) округлі гіперхромні ядра;

7) фібробласти.

Графічне відображення ознак на представлено на рис. 6.

Правило діагностування фіброаденоми:

ЯКЩО формування сосочкових структур І сплощений апокриновий епітелій І збільшенні в розмірах клітини І інтенсивно вираженні ядра І вузький обідок інтенсивно пофарбованої цитоплазми І округлі гіперхромні ядра І фібробласти ТО фіброаденома.

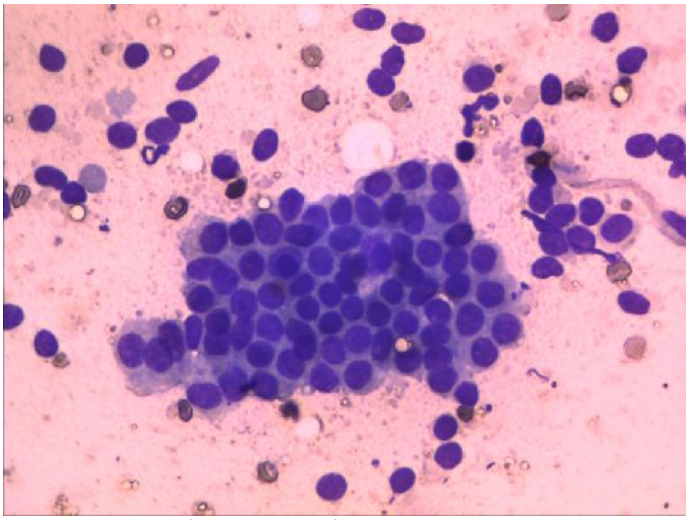


Рис. 5. Цитограма. Фіброаденома. Забарвлення за Романовським-Гімза × 200

Рис. 6. Відображення експертних ознак діагностування фіброаденоми

Нечітка база знань системи постановки діагнозу

Нечітка система обробки цитологічних зображень для постановки діагнозу патологічних станів молочної залози базується на механізмі нечіткого висновку Мамдані [6, 9]. В даному випадку вхідними змінними є ознаки патологічних станів, які присутні на зображенні. Для зручності побудови використовуються їх наступні позначення:

c1 –сплощений апокриновий епітелій;

c2 – формування сосочкових структур;

c3 – наявність секреторної активності в клітинах;

c4 – округлі гіперхромні ядра, розташовані центрально;

c5 – невелика кількість гіперхромних мономорфних клітин;

c6 – клітини розташовані пластами;

c7 – у фоні багато фагоцитів та гістіоцитів;

c8 – наявність секрету в навколо клітинному просторі;

c9 – формування клітинних комплексів;

c10 – формування сосочкоподібних комплексів із щільним розташуванням клітин в багатошарові пласти;

c11 – великі розміри клітин;

c12 – великі розміри ядер з інтенсивно вираженим хроматином;

c13 – інтенсивно виражені ядра;

c14 – вузький обідок інтенсивно пофарбованої цитоплазми;

c15 – округлі гіперхромні ядра;

c16 – фібробласти.

Кожна з ознак задається тільки двома нечіткими станами «наявна» чи «відсутня» на зображенні.

Для постановки діагнозу непроліфіративної, проліферативної мастопатії та фіброаденоми, на цитологічних зображеннях взаємовиключаючих ознак немає. Проте, є деякі ознаки, що можуть бути присутніми одночасно або повинні бути присутніми обов’язково [7].

Зокрема, для підтвердження діагнозу непроліферативної мастопатії на цитологічному зображенні

лікар-діагност повинен помітити обов'язково ознаки c1, c3, c4 та c5. Крім того, переважно присутні одночасно ознаки c2, c5, c6 або c1, c3, чи c1, c3, c8. Виходячи з цього можна зробити висновок, що для підтвердження діагнозу непроліферативної мастопатії необхідно опрацювати базу з 16 правил.

Проліферативна мастопатія та фіброаденома може бути підтверджена лікарем лише у випадку, коли на зображенні присутні одночасно ознаки c9, c10, c11 та c12 (у випадку мастопатії), а також c1, c2, c11, c13, c14, c15, c16 (у випадку фіброаденоми).

Тобто в загальному розроблена нечітка система працює на основі 18 правил типу «якщо, то»:

1. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
2. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
3. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
4. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c7 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
5. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
6. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
7. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c7 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
8. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
9. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) and (c7 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
10. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
11. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c7 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
12. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) and (c7 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
13. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
14. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c7 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
15. If (c1 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) and (c7 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
16. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c3 is present) and (c4 is present) and (c5 is present) and (c6 is present) and (c7 is present) and (c8 is present) then (diagnosis-cytology is unprolif-mastopaty)
17. If (c9 is present) and (c10 is present) and (c11 is present) and (c12 is present) then (diagnosis-cytology is prolif-mastopaty)
18. If (c1 is present) and (c2 is present) and (c11 is present) and (c13 is present) and (c14 is present) and (c15 is present) and (c16 is present) then (diagnosis-cytology is fibroadenoma)

Нечітка система аналізу цитологічних зображень

Для побудови нечіткої системи застосовується засіб FuzzyLogicToolbox середовища Matlab.

Вхідними змінними даної нечіткої системи є ознаки c1–c16, описані вище. Виходом запропонованої системи (diagnosis-cytology) є діагноз непроліферативної (unprolif-mastopaty), проліферативної мастопатії (prolif-mastopaty) та фіброаденоми (fibroadenoma). Загальний вигляд нечіткої системи для постановки діагнозу за цитологічним зображенням подано на рис. 7.

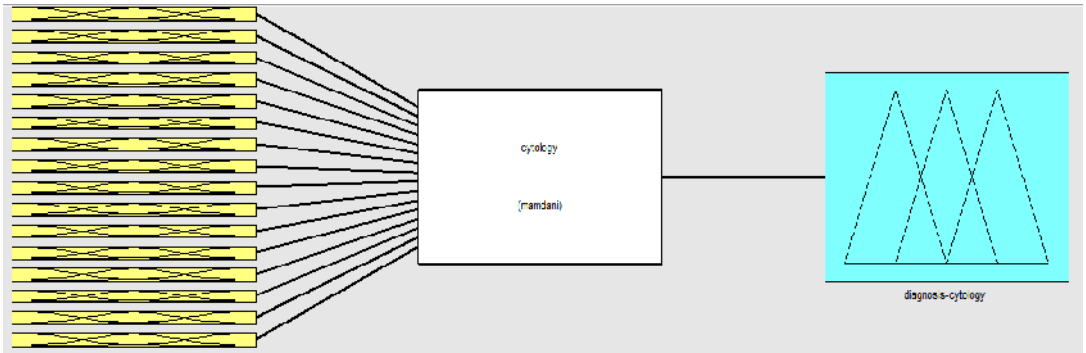


Рис. 7. Загальний вигляд розробленої нечіткої системи

Функції належності вхідних змінних, тобто ознак c1–c16, задаються дзвоноподібною формою, що найкраще відображає дві множини значень кожної з них, а саме «присутня» (present) чи «відсутня» (missing) ознака на зображенні (рис. 8) [8].

Для задання функцій належності використано трикутну форму (рис. 9).

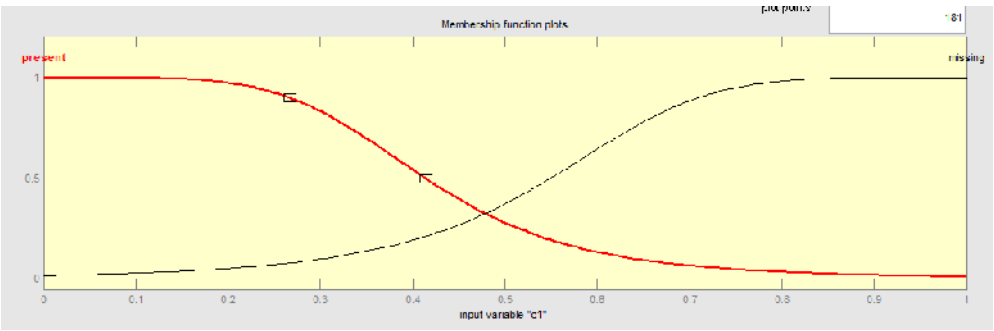


Рис. 8. Функції належності вхідних змінних на прикладі ознаки c1

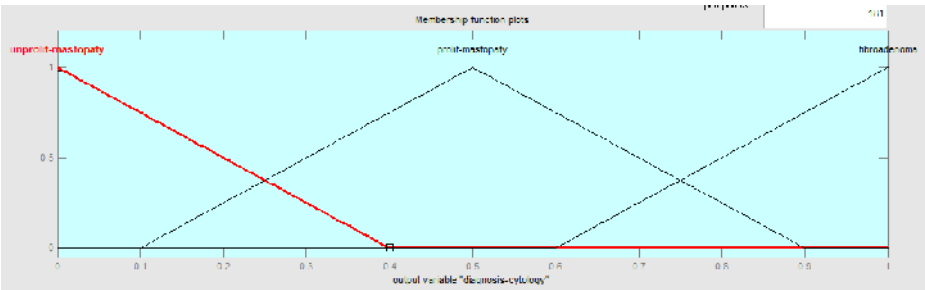


Рис. 9. Функції належності вихідної змінної diagnosis-cytology

Правильність роботи розробленої нечіткої системи випливає з аналізу отриманого нечіткого висновку при роботі заданої бази правил (рис. 10).

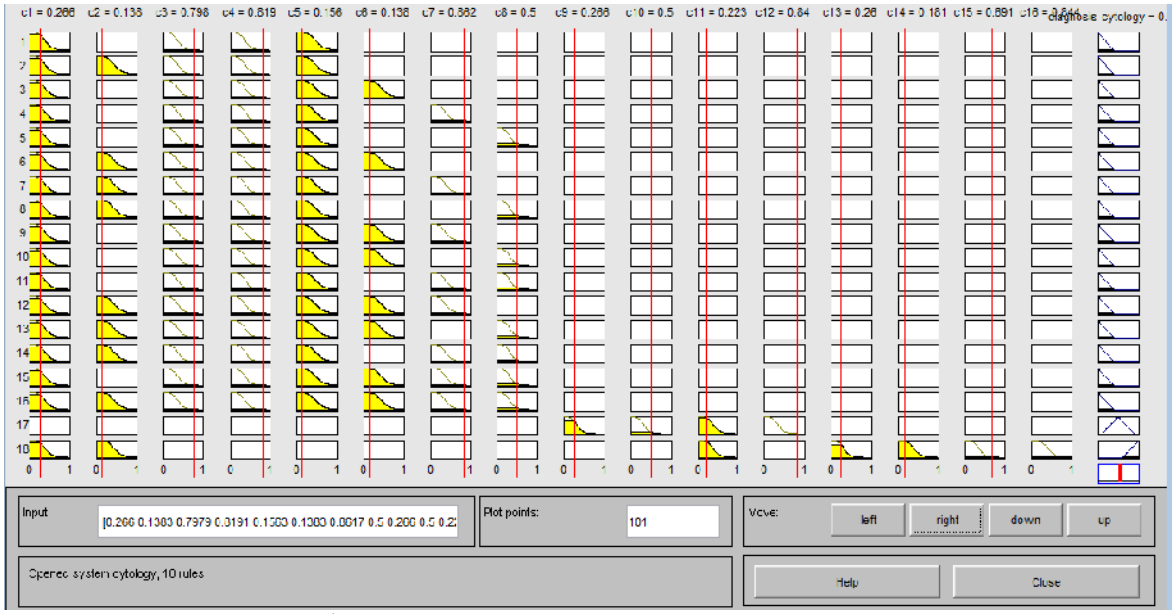


Рис. 10. Результат роботи нечіткої системи діагностування патологічних станів молочної залози

Висновки

В даній статті представлено нечітку базу знань для обробки цитологічних зображень. На основі розроблених правил нечіткого висновку побудовано систему діагностування патологічних станів молочної залози.

Запропонована нечітка система реалізована і досліджена в середовищі Matlab і її можна застосовувати для швидкої постановки чи підтвердження діагнозу патологічних станів молочної залози.

Дана нечітка система вирішує основну проблему постановки діагнозу патологічних станів молочної залози, а саме суб’єктивність суджень лікаря-діагноста при аналізі цитологічних зображень. Крім того, така система може використовуватись при сумнівних діагнозах як підтвердження думки експертів.

Програмна чи апаратна реалізація розробленої нечіткої системи діагностування патологічних станів

молочної залози може використовуватись в онкотелемедицині як додатковий засіб підтвердження діагнозу.

Дані наукові дослідження та розробки здійснювалися в рамках держбюджетної теми 0116U002500 «Гібридна інтелектуальна інформаційна технологія діагностування передракових станів молочної залози на основі аналізу зображень».

Література

1. Albertod'Onofrio "Fuzzy oncology": Fuzzy noise induced bifurcations and their application to anti-tumor chemotherapy // Applied Mathematics Letters, Volume 21, Issue 7, July 2008, Pages 662–668.

2. Seker H. A fuzzy logic based-method for prognostic decision making in breast and prostate cancers // H. Seker; M.O. Odetayo; D. Petrovic; R.N.G. Naguib // IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine (Volume: 7, Issue: 2, June 2003). P. 114–122.

3. Indira Muhic Fuzzy Analysis of Breast Cancer Disease using Fuzzy c-means and Pattern Recognition // SOUTHEAST EUROPE JOURNAL OF SOFT COMPUTING. URL: www.scjournal.com.ba

4. Kovalerchuk B. Fuzzy logic in computer-aided breast cancer diagnosis: analysis of lobulation // Kovalerchuk B., Triantaphyllou E., Ruiz J.F., Clayton J. – ArtifIntell Med. 1997 Sep 11(1): 75–85.

5. Kontoravdis D. Cytological Diagnosis Based on Fuzzy Neural Networks // D. Kontoravdis, A. Likas and P. Krakitsos - Journal of Intelligent Systems , Volume 8, Nos. 1-2, P. 55–79/

6. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications / T.J. Ross. – McGraw-Hill Inc. (USA), 1995. – 600 p.

7. Дубчак Л.О. Нечітка система діагностування патологічних станів молочної залози на основі гістологічних зображень / Л.О.Дубчак, С.О. Вербовий, Н.А. Максимів, Т.В. Дацко // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2017. – Том 7, № 1-2. – С. 47–53.

8. Lesia Dubchak Fuzzy knowledge base for diagnosing breast cancer pathological processes / Lesia Dubchak, Serhiy Verbovyy, Kateryna Berezska, Tamara Datsko // Proceedings of the XII International Scientific and technical conference Computer science & information technologies (CSIT 2017), 5–8 September 2017, Lviv, Ukraine, p. 36–39.

9. Berezsky O. Fuzzy System of Diagnosing in Oncology Telemedicine / Berezsky O., Verbovyy S., Dubchak L., Datsko T. Sensors & Transducers. Jan 2017. P. 32–38.

10. Berezsky O. Computer diagnostic tools based on biomedical image analysis / O. Berezsky, O. Pitsun, S. Verbovyy, T. Datsko, A. Bodnar // XIV-th of the International Conference on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM'2017. – P. 388–391.

11. Березький О. М. Розроблення реляційної бази даних інтелектуальної системи автоматизованої мікроскопії / О. М. Березький, О. Й. Піцун, С. О. Вербовий, Т. В. Дацко // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27(5). – С. 125–129.

12. Березький О.М. Системи автоматизованої мікроскопії: стан та перспективи розвитку / О.М. Березький, О.Й. Піцун, С.О. Вербовий // Вісник Хмельницького Національного Університету. – 2016. – № 235(2). – С. 61–68.

References

1. Albertod'Onofrio "Fuzzy oncology": Fuzzy noise induced bifurcations and their application to anti-tumor chemotherapy // Applied Mathematics Letters, Volume 21, Issue 7, July 2008, Pages 662-668

2. H. Seker A fuzzy logic based-method for prognostic decision making in breast and prostate cancers // H. Seker; M.O. Odetayo; D. Petrovic; R.N.G. Naguib - IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine(Volume: 7, Issue: 2, June 2003) P.114 - 122

3. Indira Muhic Fuzzy Analysis of Breast Cancer Disease using Fuzzy c-means and Pattern Recognition // SOUTHEAST EUROPE JOURNAL OF SOFT COMPUTING Available online at www.scjournal.com.ba

4. Kovalerchuk B. Fuzzy logic in computer-aided breast cancer diagnosis: analysis of lobulation // Kovalerchuk B., Triantaphyllou E., Ruiz J.F., Clayton J. - ArtifIntell Med. 1997 Sep;11(1):75-85.

5. D. Kontoravdis Cytological Diagnosis Based on Fuzzy Neural Networks // D. Kontoravdis, A. Likas and P. Krakitsos - Journal of Intelligent Systems , Volume 8, Nos. 1-2, Pp.55-79

6. Ross T.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications / T.J.Ross. – McGraw-Hill Inc.(USA), 1995. – 600 p.

7. Dubchak L.O. Nechitka systema diahnostuvannya patolohichnykh staniv molochnoyi zalozy na osnovi histolohichnykh zobrazhen′ / L.O. Dubchak, S.O. Verbovyy, N.A. Maksymiv, T.V. Datsko // Informatyka ta matematychni metody v modelyuvanni, 2017. - Tom 7, №1-2. – S. 47-53.

8. Lesia Dubchak Fuzzy knowledge base for diagnosing breast cancer pathological processes / Lesia Dubchak, Serhiy Verbovyy, Kateryna Berezska, Tamara Datsko //Proceedings of the XII International Scientific and technical conference Computer science & information technologies (CSIT 2017), 5-8 September 2017, Lviv, Ukraine - pp. 36-39.

9. Berezsky O. Fuzzy System of Diagnosingin Oncology Telemedicine / Berezsky O., Verbovyy S., Dubchak L., Datsko T. – Sensors & Transducers. - Jan 2017 -Pp. 32-38.

10. Berezsky O. Computer diagnostic tools based on biomedical image analysis / O. Berezsky, O. Pitsun, S. Verbovyy, T. Datsko, A. Bodnar – Proceedings of the XIV-th International Conference on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM'2017 – Pp. 388-391.

11. Berez′kyy O. M. Rozroblennya relyatsiynoyi bazy danykh intelektual′noyi systemy avtomatyzovanoyi mikroskopiyi / O. M. Berez′kyy, O. Y. Pitsun, S. O. Verbovyy, T. V. Datsko // Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny. 2017. Vyp. 27(5). S. 125–129.

12. Berez′kyy O. M. Systemy avtomatyzovanoi microskopii: stan ta perspektyvy rozvytku / O. M. Berez′kyy, O. Y. Pitsun, S. O. Verbovyy // Herald of Khmelnytsky National University. - 2016. – № 235(2). - S.61-68

Рецензія/Peer review : 20.09.2017 р. Надрукована/Printed :02.11.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Яцків В.В.

УДК 621.396

Н.А. ОДЕГОВ
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

ОПЕРАТОРЫ ДИСПЕРСИИ И СОГЛАСОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ

Рассмотрены различные модели операторов дисперсии. Под дисперсией понимается деформация сигнала во временной или частотной области. Показано, что материальная дисперсия может моделироваться нестационарным линейным оператором. Получены аналитические выражения для оператора материальной дисперсии в форме импульсной характеристики. Получена формула согласованного с такой характеристикой сигнала.

Полученные модели уточнены для случая бесконечной и конечной частотной полосы.

Определены числовые параметры устойчивости полученных решений.

Получены аналитические выражения для оператора дисперсии с учетом неравномерности коэффициента затухания по частоте. Показано, что данный фактор влияет не только на затухание оптического импульса, но и на его деформацию.

Получены аналитические выражения для определения эффективной длительности импульса с учетом неравномерности характеристики затухания по частоте.

***Ключевые слова**: дисперсия, функция, сигнал, спектр, преобразование Фурье, импульсная характеристика, нестационарный фильтр, согласованный сигнал.*

N.A. ODEGOV
Odessa National Academy of Telecommunications. A.S. Popova

DISPERSION OPERATORS AND MATCHED OPTICAL SIGNALS

Various models of dispersion operators are considered. Dispersion means deformation of a signal in a time or frequency domain. It is shown that the material dispersion can be modeled by a nonstationary linear operator. Analytic expressions are obtained for the operator of material dispersion in the form of an impulse response. A formula of a signal matched with this characteristic is obtained .

The obtained models are refined for the case of an infinite and finite frequency band.

Numerical parameters of the stability of the solutions obtained are determined.

Analytic expressions are obtained for the dispersion operator taking into account the nonuniformity of the damping coefficient with respect to frequency. It is shown that this factor affects not only the attenuation of the optical pulse, but also its deformation.

Analytic expressions are obtained for determining the effective pulse duration, taking into account the nonuniformity of the damping characteristic with respect to frequency.

***Keywords:** dispersion, function, signal, spectrum, Fourier transform, impulse response, non-stationary filter, matched signal.*

Постановка задачи

В классической трактовке [1] под дисперсией понимается зависимость коэффициента преломления от длины волны или, что то же самое, – от частоты. Применительно к волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) под дисперсией понимается [2] увеличение длительности (уширение) импульса по мере перемещения его вдоль оптического волокна (ОВ). При этом дисперсия подразделяется на хроматическую (зависящую от длины волны), модовую (зависящую от разности времени хода разнонаправленных лучей в ОВ) и поляризационную. Данные явления принято рассматривать в разных моделях [3-5].

С нашей точки зрения, уширение импульса является только одной из причин ограничения протяженности регенерационных участков (РУ) или ограничения скорости передачи данных за счет предотвращения межимпульсной интерференции. Наличие достоверной информации о форме импульса на приемной стороне позволяет, вообще говоря, отфильтровать небольшие перекрытия между импульсами. С другой стороны, важно, какой метод используется для детектирования и распознавания сигналов. Так, для порогового детектора важно, чтобы импульс на приемной стороне имел ярко выраженную моду. Для корреляционной обработки важно, чтобы импульс сохранял в основном свою форму.

Поэтому под ***дисперсией*** будем понимать искажение первоначальной формы оптического сигнала, вызванное ***всевозможными*** причинами. Соответственно, в класс ***операторов дисперсии*** будем включать любые зависимости между сигналами на входе в ОВ и на выходе из него или зависимости, устанавливающие связь некоторых параметров сигналов на входе и на выходе ОВ.

Таким образом, в класс операторов дисперсии в качестве моделей включаются и уравнения Максвелла, и простейшая формула для расчета материальной дисперсии [2]:

$$\Delta T = -\frac{\lambda_0}{c}\frac{d^2 n}{d\lambda^2}\Delta\lambda z, \tag{1}$$

где ΔT – приращение эффективной длительности импульса на расстоянии z от точки ввода сигнала в ОВ,

λ_0 – центральная длина волны излучения лазера, c – скорость света в вакууме, $\Delta\lambda$ – ширина полосы излучения лазера, а значение второй производной коэффициента преломления n берется в точке λ_0.

Уравнения Максвелла в исходном виде сложны для инженерных приложений. С другой стороны, удобные выражения (1) не дают информации о зависимости вычисляемых параметров от тонкой структуры сигнала. Поэтому в прикладных задачах используются также модели в виде дифференциальных уравнений, в том числе нелинейных [6]. Такие модели даже в случае отсутствия решений в аналитическом виде позволяют получать решения с помощью численных методов [7].

С нашей точки зрения представляется продуктивным подход, в котором дисперсионные операторы представляются в форме импульсных характеристик фильтров (ИХФ) или, что эквивалентно – в виде частотных коэффициентов передачи (ЧКП). При этом появляется возможность использовать существующий аппарат теории функций комплексного аргумента, преобразования Фурье и теории оптимальной фильтрации.

Отличие от задачи синтеза оптимальных фильтров в данном контексте заключается в том, что решается ***обратная*** задача. Здесь полагается, что фильтр задан свойствами ОВ, а задача сводится к выбору на заданном множестве сигналов такого сигнала, который доставляет экстремальное значение выбранному показателю качества. Такие сигналы далее и будут называться ***согласованными***.

Таким образом, задача синтеза согласованных оптических сигналов в рамках данной статьи сводится к следующим подзадачам.

1. По заданным характеристикам ОВ определить оператор дисперсии, в общем случае нестационарный, в форме импульсной характеристики $h(t,\tau)$, связывающей входной $u_{inp}(t)$ и выходной $u_{out}(T,\tau)$ сигналы преобразованием в виде интеграла Дюамеля:

$$u_{out}(T,\tau)=\int_{-\infty}^{T}u_{inp}(t)h(T-t,\tau)dt\,. \tag{2}$$

2. Для заданной импульсной характеристики $h(t,\tau)$ из множества входных сигналов $\{u_{inp}\}$ выбрать оптимальный по заданному критерию качества сигнал.

Известно [8], что для частного линейного случая импульсная характеристика согласованного фильтра определяется как зеркальное отражение входного сигнала с точностью до постоянного множителя:

$$u_{inp}(t)=\alpha h(-t)\,. \tag{3}$$

В данном случае под ***согласованием*** понимается, что на выходе фильтра максимизируется отношение сигнал/шум. С учетом симметрии операции свертки (2) при заданной ИХФ, согласованным в этом смысле является сигнал, определяемый зависимостью (3).

Интересно, что согласованный сигнал в данной модели обладает еще одним дополнительным полезным свойством, которое заслуживает отдельного предложения.

Теорема о сжатии импульса. Для ИХФ с равной нормой

$$\|h\|^2=\int_{-\infty}^{\infty}h^2(t)dt \tag{4}$$

и для входных сигналов равной энергии

$$\|u_{inp}\|^2=\int_{-\infty}^{\infty}u_{inp}^2(t)dt \tag{5}$$

при условии равенства второго момента выходного сигнала для всех входных сигналов

$$T_{out}^2=\int_{-\infty}^{\infty}t^2u_{out}^2(t)dt \tag{6}$$

наименьшую эффективную длительность выходного сигнала

$$T_{eff}^2=T_{out}^2\Big/\|u_{out}\|^2 \tag{7}$$

доставит согласованный в смысле (3) входной сигнал.

Доказательство Теоремы элементарно следует из неравенства Коши-Шварца.

В самом деле, при равных числителях в выражении (7), что задано условием (6) Теоремы, минимальное значение дроби будет при максимальном значении знаменателя, которое суть – энергия сигнала на выходе. При этом знаменатель дроби в силу определения (2) может быть представлен как скалярное произведение, подчиняющееся неравенству Коши-Шварца:

$$\|u_{out}\|=\langle u_{inp},h\rangle\le\|u_{inp}\|\|h\|\,. \tag{8}$$

Верхняя грань (равенство) в выражении (8) достигается, если выполняется условие (3), т.е. для согласованного сигнала.

Таким образом, если ИХФ моделирует оператор дисперсии, то согласованный сигнал обладает при определенных условиях антидесперсионными свойствами.

Конечно, в Теореме использовано очень сильное допущение (6), ограничивающее класс входных

сигналов. На самом деле не исключено, что можно оптимизировать входные сигналы за счет уменьшения числителя в выражении (7). Однако, такая задача должна решаться не в общем случае, а для конкретного вида операторов дисперсии.

Также отметим, что приведенные зависимости элементарно обобщаются на случай комплексных сигналов и ИХФ.

Оператор материальной дисперсии

Рассмотрим весьма упрощенную модель. Предположим, что ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления используется в одномодовом режиме, что энергия сигнала распространяется строго вдоль ОВ, что начальная поляризация сигнала круговая и поляризационные эффекты отсутствуют, что мощность сигнала достаточно мала для того, чтобы исключить нелинейные эффекты и, наконец, что затухание сигнала не зависит от частоты.

При этих условиях дисперсия сводится к материальной дисперсии [2], т.е. к зависимости коэффициента преломления от частоты и вызванной этим деформацией входного сигнала.

Показано [9], что с высокой точностью зависимость коэффициента преломления от частоты может быть представлена полиномом второй степени. В рабочем диапазоне длин волн от 800 нм до 1800 нм (соответственно, в частотном диапазоне от 175 до 375 ТГц) относительная погрешность аппроксимации трехчленной формулы Селмейера не превышает 10^{-4}. Еще большую точность получаем при аппроксимации частотной зависимости коэффициента преломления в разложении по частичной сумме ряда Тейлора вблизи некоторой заданной циклической частоты f_0. Для центральной длины волны 1550 нм (частота около 193,4 ТГц) в полосе частот шириной порядка 100 ГГц получены значения коэффициента преломления и первых его двух производных. Они представлены в табл.1, где $n^{[m]}$ обозначает производную функции порядка m.

Относительная погрешность аппроксимации δn коэффициента преломления зависимостью

$$n(f) = n(f_0) + n^{[1]}(f_0)(f - f_0) + 1/2\, n^{[2]}(f_0)(f - f_0)^2 \tag{9}$$

имеет в данном случае порядок 10^{-8}, что можно считать пренебрежимо малой величиной.

Таблица 1

Зависимость производных коэффициента преломления от состава ОВ

Material	$n(f_0)$	$n^{[1]}(f_0)$, Gc^{-1}	$n^{[2]}(f_0)$, Gc^{-2}	δn
SiO2	1,44E+00	9,60E-17	-6,97E-29	3,93E-08
13,5%GeO2 86,5%SiO2	1,47E+00	7,78E-17	-6,89E-29	3,85E-08
7,0%GeO2 93,0%SiO2	1,46E+00	7,99E-17	-1,52E-29	8,13E-09
4,1%GeO2 95,9%SiO2	1,45E+00	9,46E-17	-8,78E-30	4,32E-09
13,5%Be2O3 86,5%SiO2	1,44E+00	1,09E-16	-3,25E-29	1,78E-08
3,1%GeO2 96,9%SiO2	1,45E+00	9,63E-17	-5,71E-29	3,19E-08
3,5%GeO2 96,5%SiO2	1,45E+00	9,67E-17	-5,59E-29	3,12E-08
3,0%B2O3 97,0%SiO2	1,44E+00	9,92E-17	-3,22E-29	1,77E-08
3,5%B2O3 96,5%SiO2	1,44E+00	9,78E-17	-5,63E-29	3,16E-08
3,3%GeO2 9,2%B2O3 87,5%SiO2	1,44E+00	1,00E-16	-7,57E-29	4,27E-08
2,2%GeO2 3,3%B2O3 94,5%SiO2	1,45E+00	9,68E-17	-3,80E-29	2,11E-08
9,1%P2O5 90,9%SiO2	1,46E+00	1,00E-16	-4,76E-29	2,63E-08
1,0%F 99,0%SiO2	1,44E+00	9,38E-17	-3,41E-29	1,89E-08
16,9%Na2O 32,5%B2O3 50,6%SiO2	1,51E+00	1,11E-16	-5,11E-29	2,73E-08

В качестве модели входного сигнала примем узкополосный аналитический сигнал

$$u(t) = U(t)\exp(j\omega_0 t), \tag{10}$$

где $U(t)$ – низкочастотная составляющая сигнала (НЧС), ω_0 – несущая частота.

В качестве исходной модели преобразования в ОВ примем решение волнового уравнения [10]:

$$u(t,z) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} g(\omega)\exp[j\omega t - jk(\omega)z]d\omega, \tag{11}$$

где z – расстояние, пройденное сигналом вдоль ОВ, $g(\omega)$ – спектральная плотность сигнала (10), $k(\omega)$ – волновое число, определяемое как $k(\omega) = n(\omega)\omega / c$, где c – скорость света в вакууме.

Составляющую фазы $k(\omega)z$ в зависимости (11) удобно представить в несколько ином виде:

$$k(\omega)z = q(\omega)\tau,\ q(\omega) = n(\omega)\omega,\ \tau = z/c. \tag{12}$$

При этом функция $q(\omega)$ имеет размерность угловой частоты [рад/с], а параметр τ – размерность времени.

Тогда с учетом высокой точности аппроксимации (9) разложение фазы в выражении (11) в ряд Тейлора приводит к зависимости:

$$u(t,\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}g(\Omega+\omega_0)\exp[j(\varphi_0+\varphi_1\Omega+\varphi_2\Omega^2)]d\Omega, \quad (13)$$

где

$$\Omega=\omega-\omega_0,\ \varphi_0=\omega_0(t-n_0\tau),\ \varphi_1=t-q_0^{[1]}\tau=t-(n_0^{[1]}\omega_0+n_0)\tau,$$

$$\varphi_2=-\frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau=-\left(n_0^{[1]}+\frac{n_0^{[2]}\omega_0}{2}\right)\tau,$$

где здесь и далее выражение вида $y_0^{[n]}=y^{[n]}(x_0)$ соответствует значению производной функции $y(x)$ порядка n в точке x_0.

После переноса частоты (гетеродинирования) с учетом определения (10) зависимость (13) преобразуется к формуле эволюции НЧС входного сигнала, которая и переносит информацию:

$$U(t,\tau)=\frac{\exp(-jn_0\omega_0\tau)}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}G(\Omega)\exp[j(\varphi_1\Omega+\varphi_2\Omega^2)]d\Omega, \quad (14)$$

где

$$G(\Omega)=g(\Omega+\omega_0)\exp(-j\omega_0 t)=\int_{-\infty}^{\infty}U(t,\tau=0)\exp(-j\Omega t)dt. \quad (15)$$

– спектральная плотность НЧС входного сигнала.

Зависимости (14) и (15) можно свести к следующей формуле:

$$U(t,\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}G(\Omega)H(\Omega,\tau)\exp(j\Omega t)d\Omega, \quad (16)$$

где $H(\Omega,\tau)$ – ЧКП некоторого нестационарного линейного фильтра, который с учетом ранее полученных зависимостей представляется в следующей аналитической форме:

$$H(\Omega,\tau)=\exp(-jn_0\omega_0\tau)\exp[j(\varphi_1-t)\Omega+j\varphi_2\Omega^2]. \quad (17)$$

ЧКП в форме (17) является одной из форм оператора дисперсии. Соответственно ИХФ определяется как обратное преобразование Фурье ЧКП:

$$h(t,\tau)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}H(\Omega,\tau)\exp(j\Omega t)d\Omega=\frac{\exp(-jn_0\omega_0\tau)}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\exp(j\varphi_1\Omega+j\varphi_2\Omega^2)d\Omega. \quad (18)$$

Для получения аналитического выражения ИХФ (18) воспользуемся табличным интегралом [11,с. 344]:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\exp[j(\lambda x^2+\mu x)]dx=\sqrt{\frac{\pi}{\lambda}}\exp\left[\frac{j(\lambda\pi-\mu^2)}{4\lambda}\right],\qquad \lambda>0. \quad (19)$$

С учетом обозначений в формуле (18) полагаем $\lambda=\varphi_2$, $\mu=\varphi_1$. Условие существования интеграла (19) $\lambda>0$ выполнено для всех значений параметра $\tau>0$, поскольку $\varphi_2=-\frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau=-\left(n_0^{[1]}+\frac{n_0^{[2]}\omega_0}{2}\right)\tau$, а выражение внутри скобок имеет отрицательное значение, что подтверждают данные табл. 1. Заметим, что в частном случае $\tau=0$ оператор, моделируемый ИХФ (18) вырождается в тождественный оператор, когда сигнал на выходе ОВ полностью повторяет сигнал на входе, что естественно.

После тождественных преобразований выражения (18) с учетом формулы (19) получаем выражение для ИХФ:

$$h(t,\tau)=\frac{1}{\sqrt{-2\pi q_0^{[2]}\tau}}\{\cos[\eta_0+(\eta_1+\eta_2 t)t]+j\sin[\eta_0+(\eta_1+\eta_2 t)t]\}, \quad (20)$$

где

$$\eta_0=\frac{\pi}{4}+\tau\left[\frac{1}{2}\frac{(q_0^{[1]})^2}{q_0^{[2]}}-n_0\omega_0\right],\qquad \eta_1=-\frac{q_0^{[1]}}{q_0^{[2]}},\qquad \eta_2=-\frac{1}{2q_0^{[2]}\tau}. \quad (21)$$

Соответственно, для согласованного сигнала во временной области $u_{inp}(t)=h^*(-t)$, где здесь и далее символ «*» означает оператор комплексного сопряжения:

$$u_{inp}(t)=\frac{1}{\sqrt{-2\pi q_0^{[2]}\tau}}\{\cos[\eta_0-(\eta_1-\eta_2 t)t]-j\sin[\eta_0-(\eta_1-\eta_2 t)t]\}. \quad (22)$$

Анализ выражений (20–22) показывает следующее.

1. В принятых предположениях ИХФ является моделью линейного нестационарного оператора.

2. Соответственно, сигнал (22) проявляет свои оптимальные свойства лишь на определенном расстоянии $z=\tau c$.

3. Сигнал (22) имеет структуру линейно частотно модулированного (ЛЧМ) сигнала, что является вполне ожидаемым результатом, поскольку одним из способов формирования таких сигналов является использование дисперсионной линии задержки (ДЛЗ) [12]. ОВ в первом приближении как раз и представляет собой ДЛЗ. При этом параметр η_0 – начальная фаза сигнала, η_1 – начальное значение угловой частоты, η_2 – параметр девиации частоты.

4. ИХФ является комплексной функцией, равно как и согласованный сигнал (22) – комплексный. Поэтому формирование таких сигналов требует учета фазовых соотношений, а не только распределения энергии сигнала в частотной области.

5. Выражения (20–22) ничего не говорят об устойчивости полученных решений в смысле [13], что в данном случае формулируется так: «Не приведет ли малое изменение параметра нестационарности τ к совершенно иным выводам?». Определим показатель устойчивости в форме:

$$\delta h=\left|h(t,\tau+\delta_\tau)-h(t,\tau)\right|/\left|h(t,\tau)\right|, \quad (23)$$

где δ_τ – малое приращение параметра настационарности, которое для определенности будем полагать положительной величиной. С учетом малости этого параметра

$$h(t,\tau+\delta_\tau)\approx h(t,\tau)+h'(t,\tau)\delta_\tau$$

выражение (23) преобразуется к виду:

$$\delta h=\delta_\tau\sqrt{h'(t,\tau)h'^*(t,\tau)}\,/\sqrt{h(t,\tau)h^*(t,\tau)}\,. \quad (24)$$

Из выражения для ИХФ (20) следует, что данную функцию можно представить в виде:

$$h(t,\tau)=a(\tau)\exp[jb(t,\tau)]$$

где $a(\tau)$ и $b(t,\tau)$ – вещественные функции скалярных аргументов. С учетом последнего выражения показатель устойчивости (23) после выполнения ряда простых преобразований можно представить в виде:

$$\delta h=\delta_\tau\sqrt{[a'(\tau)]^2+a^2(\tau)[b'(t,\tau)]^2}\,/\sqrt{a^2(\tau)}\,. \quad (25)$$

Поскольку $\delta h=\delta h(t,\tau)$ – функция, а не функционал, она принимает определенное значение при определенных значениях аргументов. Будем рассматривать случай, когда $\tau=10^{-3}$, что приблизительно соответствует расстоянию, пройденному импульсом $z\approx 200км$. Несущую частоту примем равной $\omega_0=2\pi 200ТГц\approx 10^{15}[рад/с]$, приблизительно соответствующей рабочей длине волны $\lambda_0\approx 1550нм$. Временной параметр примем ограниченным порядком $t\le 10нс=10^{-11}с$.

Тогда с учетом данных табл. 1 получаем оценки порядков величин в формуле (20). Ниже символ «≈» будет иметь смысл высказывания: «Имеет порядок». Составляющие фазы $b(t,\tau)$ имеют следующие порядки:

$$\eta_0\approx n_0\omega_0\tau\approx 10^{15}10^{-3}=10^{12},\quad \eta_1 t\approx 10^{14}10^{-11}=10^3,\quad \eta_2 t^2\approx 10^{30}10^3 10^{-22}=10^{11}, \quad (26)$$

откуда следует порядок фазы $b(t,\tau)\approx\eta_0\approx 10^{12}$. Порядок амплитудного коэффициента:

$$a(\tau)=\frac{1}{\sqrt{-2\pi q_0^{[2]}\tau}}=\frac{1}{\sqrt{-2\pi(n_0^{[1]}+0{,}5n_0^{[2]}\omega_0)\tau}}\approx\frac{1}{\sqrt{-\pi n_0^{[2]}\omega_0\tau}}\approx\frac{1}{\sqrt{10^{-30}10^{15}10^{-3}}}=10^9, \quad (27)$$

а его производной:

$$a'(\tau)=-\frac{1}{2}\frac{a(\tau)}{\tau}\approx 10^9 10^3=10^{12}.$$

С учетом порядков (26) и (27) $[a'(\tau)]^2 << a^2(\tau)[b'(t,\tau)]^2$ выражение для показателя устойчивости (25) сильно упрощается:

$$\delta h\approx\delta_\tau\sqrt{a^2(\tau)[b'(t,\tau)]^2}\,/\sqrt{a^2(\tau)}=\delta_\tau\left|b(t,\tau)\right|\approx\delta_\tau n_0\omega_0\approx\delta_\tau 10^{15}. \quad (28)$$

Полученный результат показывает, что оптимальные свойства согласованного сигнала очень сильно зависят от расстояния. В тех предположениях, которые положены в основу расчетов, можно считать, что импульс сохранит согласованность при $\delta_\tau\le 10^{-17}$, что соответствует ошибке в определении расстояния

порядка нескольких нанометров. Практически это означает, что небольшое смещение патчкорда может привести к потере устойчивости приема.

Промежуточный вывод заключается в том, что решение задачи оптимизации оптических сигналов требует анализа устойчивости. Также можно предположить, что наиболее эффективными методами повышения скорости передачи данных является применение систем с обратной связью, которые реализуют служебные протоколы адаптации параметров генерируемого сигнала к характеристикам конкретной оптической линии.

Оператор материальной дисперсии для ограниченной полосы частот

Выражение для ИХФ (20) получено интегрированием в бесконечных пределах. Это позволило получить замкнутые аналитические выражения, пригодные только для поверхностного анализа. Для приложений такой подход вряд ли является конструктивным. Может даже показаться, что потеряна размерность. Она не потеряна, а скрыта за символом ленты Мебиуса.

Кроме того, интегрирование в бесконечных пределах противоречит предположению об узкополосности сигнала (10). Для получения выражений ИХФ в ограниченной полосе частот упростим формулы (13) и (14). После демодуляции составляющей фазы φ_0 можно пренебречь, а составляющая фазы φ_1 в силу теоремы запаздывания отвечает за перенос энергетического центра сигнала с групповой скоростью $c/(n_0^{[1]}\omega_0 + n_0)$. Таким образом, собственно за деформацию импульса отвечают производные фазы высших порядков [6], а в рассматриваемой модели – составляющая фазы φ_2. Тогда:

$$U(t,\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\Delta\Omega}^{\Delta\Omega} G(\Omega)H(\Omega,\tau)\exp(j\Omega t)d\Omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\Delta\Omega}^{\Delta\Omega} G(\Omega)\exp(-j\frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau\Omega^2)\exp(j\Omega t)d\Omega,$$

$$h(t,\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\Delta\Omega}^{\Delta\Omega} \exp(-j\frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau\Omega^2)\exp(j\Omega t)d\Omega. \quad (29)$$

Для вычисления интеграла (29) воспользуемся табличным интегралом [11, с.240]:

$$\int\begin{Bmatrix}\sin(ax^2+bx+c)\\ \cos(ax^2+bx+c)\end{Bmatrix}dx = \sqrt{\frac{\pi}{2a}}\left[\cos\frac{4ac-b^2}{4a}\begin{Bmatrix}S[(2ax+b)^2/(4a)]\\ C[(2ax+b)^2/(4a)]\end{Bmatrix} \pm \sin\frac{4ac-b^2}{4a}\begin{Bmatrix}C[(2ax+b)^2/(4a)]\\ S[(2ax+b)^2/(4a)]\end{Bmatrix}\right]$$

где $C()$ и $S()$ – интегралы Френеля. С учетом вхождения переменных в формуле (29) в табличном интеграле принимаем $a = -\frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau$, $b = t$, $c = 0$, $x = \Omega$. Условие существования табличного интеграла $a > 0$ выполнено для всех $\tau > 0$, поскольку $q_0^{[2]} < 0$.

Непосредственные преобразования выражения (29) сложны для последующего анализа. Поэтому выполним его упрощение с учетом ранее рассмотренных порядков величин. Фаза $b^2/4a = -t^2/(2q_0^{[2]}\tau)$ имеет порядок $10^{-22}10^{14}10^3 = 10^{-5}$, то есть в выражениях табличного интеграла можно положить $\cos[-b^2/(4a)] \approx 1$, $\sin[-b^2/(4a)] \approx 0$. Тогда выражение (29) значительно упрощается:

$$h(t,\tau) = \frac{1}{2\sqrt{-\pi q_0^{[2]}\tau}}\left\{C[(2ax+b)^2/(4a)] + jS[(2ax+b)^2/(4a)]\right\}\Big|_{-\Delta\Omega}^{\Delta\Omega}. \quad (30)$$

Последнее выражение также является весьма сложным для анализа. Поэтому воспользуемся аппроксимациями интегралов Френеля для больших значений аргумента [14, с. 128]:

$$C(\theta) \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi\theta}\sin\frac{\pi}{2}\theta^2 - \frac{1}{\pi^2\theta^3}\cos\frac{\pi}{2}\theta^2, \quad S(\theta) \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi\theta}\cos\frac{\pi}{2}\theta^2 - \frac{1}{\pi^2\theta^3}\sin\frac{\pi}{2}\theta^2. \quad (31)$$

В зависимостях (31) также важны порядки. В дополнение к ранее рассмотренным значениям величин положим, что ширина полосы примерно равна 100ГГц, то есть пределы интегрирования в выражении (29) имеют порядок 10^{11}. После тождественных преобразований и учета порядков фазовая функция в зависимостях (31) получается в виде:

$$\theta = -\frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau\Omega^2 + \Omega t - \frac{1}{2}\frac{t^2}{q_0^{[2]}\tau} \approx \Omega t - \frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau\Omega^2. \quad (32)$$

Порядок фазовой функции θ с учетом допущений 10^5. Таким образом, последние слагаемые в формулах (31) незначительны. После исключения этих слагаемых получаем выражение для ИХФ в замкнутом виде:

$$\operatorname{Re} h(t,\tau) = \frac{1}{2\sqrt{-\pi q_0^{[2]}\tau}}\left(\frac{1}{\pi\theta_+}\sin\frac{\pi}{2}\theta_+^2 - \frac{1}{\pi\theta_-}\sin\frac{\pi}{2}\theta_-^2\right)$$

$$\operatorname{Im} h(t,\tau) = \frac{1}{2\sqrt{-\pi q_0^{[2]}\tau}}\left(-\frac{1}{\pi\theta_+}\cos\frac{\pi}{2}\theta_+^2 + \frac{1}{\pi\theta_-}\cos\frac{\pi}{2}\theta_-^2\right), \tag{33}$$

$$\theta_+ = \Delta\Omega t - \frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau\Delta\Omega^2 \quad , \qquad \theta_- = -\Delta\Omega t - \frac{1}{2}q_0^{[2]}\tau\Delta\Omega^2 .$$

Учтем, что слагаемое Ωt в формуле (32) имеет меньший порядок и в формулах (33) можно ограничиться приближением $1/\pi\theta_+ \approx 1/\pi\theta_+ \approx -2/(\pi q_0^{[2]}\tau\Delta\Omega^2)$. Тогда после тождественных преобразований формул (33) с использованием известных тождеств разности тригонометрических функций получим окончательно:

$$h(t,\tau) = \frac{2\Delta\Omega^{-2}}{\sqrt{-\pi^3(q_0^{[2]})^3\tau^3}}\sin\frac{\pi}{2}\left[t^2\Delta\Omega^2 + \frac{1}{4}(q_0^{[2]})^2\tau^2\Delta\Omega^4\right]\exp(-j\frac{\pi}{2}q_0^{[2]}\pi t\Delta\Omega^3). \tag{34}$$

Сравнение выражений (20) и (34) показывает, что они имеют общий по структуре множитель с ЛЧМ. В то же время, выражение (34) содержит дополнительный экспоненциальный множитель, обусловливающий фазовую модуляцию. Также отметим, что ИХФ в последнем случае существенно зависит от полосы частот, занимаемой низкочастотной составляющей сигнала. Если предположить, что сигнал имеет свойство высокой частотной когерентности ($\Delta\Omega \approx 10^9$), а временной параметр увеличить до 100…1000 пс, то даже структура выражения (34) может измениться.

Оператор дисперсии с учетом частотной зависимости коэффициента затухания

В рассмотренных выше моделях дисперсионные модели обусловливали искажение сигнала во временной области. При этом энергетический спектр сигнала остается неизменным [6]. Доказывается данное утверждение элементарно. В самом деле, из выражений (16) и (17) спектральная плотность низкочастотной составляющей сигнала на расстоянии $z = \tau c$ может быть представлена в виде:

$$G(\Omega,\tau) = G(\Omega,\tau=0)H(\Omega,\tau) = G(\Omega,\tau=0)\exp[j\varphi(\Omega,\tau,t)], \tag{35}$$

откуда для энергетического спектра:

$$\left|G(\Omega,\tau)\right|^2 = G(\Omega,\tau)G^*(\Omega,\tau) = G^2(\Omega,\tau=0)\exp[j\varphi(\Omega,\tau,t) - j\varphi(\Omega,\tau,t)] = G^2(\Omega,\tau=0). \tag{36}$$

При этом, заметим, функция $\varphi(\Omega,\tau,t)$ – произвольная функция.

Устойчивость энергетического спектра к дисперсионным деформациям позволяет предложить методы распознавания сигналов в частотной области, инвариантные к материальной дисперсии. С физической точки зрения суть явления заключается в том, что энергия перераспределяется между действительной и мнимой частями спектра, но перераспределения энергии между отдельными частотными составляющими сигнала не происходит.

Дело осложняется тем, что деформация сигнала обусловливается не только зависимостью коэффициента преломления от частоты, но и от иных физических причин. Одна из них – зависимость коэффициента затухания от частоты.

Частотно зависимую функцию затухания определим в форме:

$$\mathrm{P}(\omega) = \exp[-\gamma(\omega)z] = \exp[-\psi(\omega)\tau],\ \psi(\omega) = \gamma(\omega)c$$

где $\gamma(\omega) > 0$ – удельный по длине линии коэффициент затухания, а функция $\psi(\omega)$ вводится для удобства согласования с ранее полученными зависимостями.

Для относительно узкой полосы частот функцию $\psi(\omega)$ также представим в виде частичной суммы ряда Тейлора:

$$\psi(\omega) = \psi_0 + \psi_0^{[1]}\Omega + \frac{1}{2}\psi_0^{[2]}\Omega^2. \tag{37}$$

Постоянная составляющая ψ_0 в последнем выражении обусловливает одинаковое затухание всех частотных составляющих сигнала и не приводит к изменению его формы или спектрального состава. Тогда, по аналогии с выражением (29), получим исходную формулу для дисперсионной ИХФ с учетом затухания:

$$h(t,\tau) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\Delta\Omega}^{\Delta\Omega}\exp[(-\psi_0^{[2]} - jq_0^{[2]})\frac{1}{2}\tau\Omega^2]\exp[(-\psi_0^{[1]}\tau + jt)\Omega]d\Omega. \tag{38}$$

Интегрирование в бесконечных пределах в формуле (38) можно выполнить с помощью табличного интеграла [11, с. 344]:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-px^2-\mu x)dx=\sqrt{\frac{\pi}{p}}\exp(\frac{\mu^2}{4p}),\quad \operatorname{Re} p>0. \tag{39}$$

В нашем случае $p=(-\psi_0^{[2]}-jq_0^{[2]})\frac{1}{2}\tau$, $\mu=-\psi_0^{[1]}\tau+jt$, $x=\Omega$. Условие существования интеграла $\operatorname{Re} p=\psi_0^{[2]}>0$ выполнено, по крайней мере, в окрестностях окон прозрачности ОВ, где коэффициент затухания имеет локальные минимумы. Тогда формула для ИХФ представляется в виде:

$$h(t,\tau)=\sqrt{\frac{2\pi}{(-\psi_0^{[2]}-jq_0^{[2]})\tau}}\exp\left[\frac{(-\psi_0^{[1]}\tau+jt)^2}{2(-\psi_0^{[2]}-jq_0^{[2]})\tau}\right]. \tag{40}$$

Анализ формулы (40) показывает, что даже в точках т.н. нулевой дисперсии сигнал подвергается деформациям за счет неравномерности коэффициента затухания. Также из этой формулы видно, что согласованный сигнал будет иметь структуру ЛЧМ сигнала. При этом оператор дисперсии, очевидно, также нестационарный.

Более выразительные формы оператора дисперсии с учетом затухания можно получить для зависимости эффективной длительности импульса от его спектрального состава. В качестве исходной примем формулу [14, с.34]:

$$T_{eff}^2=\frac{1}{2\pi\|g\|^2}\int_{-\infty}^{\infty}|g'(\omega)|^2d\omega, \tag{41}$$

где $\|g\|^2$ – энергия сигнала, которую в данном случае удобно выразить через норму спектральной плотности, $g'(\omega)$ – первая производная спектральной плотности.

В нашем случае формула (41) требует некоторых уточнений. Во-первых, функционал $\|g\|^2$ зависит от расстояния, пройденного импульсом вдоль ОВ: затуханием пренебречь в данной модели нельзя. Во-вторых, спектральная плотность будет определяться в низкочастотной области с учетом влияющих на деформацию сигнала функций. Тогда формула (42) принимает вид:

$$T_{eff}^2=\frac{1}{2\pi\|g(\tau)\|^2}\int_{-\infty}^{\infty}|\{\exp[-\psi(\Omega)\tau-j\varphi(\Omega)\tau]G(\Omega)\}|^2d\Omega, \tag{42}$$

где функция $\psi(\Omega)$ определяется зависимостью (37), $\varphi(\Omega)=q_0^{[2]}/2$ – функция деформации сигнала за счет материальной дисперсии, $G(\Omega$ – низкочастотная составляющая спектральной плотности в момент ввода сигнала в ОВ,

$$\|g(\tau)\|^2=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|\{\exp[-\psi(\Omega)\tau-j\varphi(\Omega)\tau]G(\Omega)\}|^2d\Omega=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-2\psi_0\tau-2\psi_0^{[1]}\Omega-\psi_0^{[2]}\Omega^2)G^2(\Omega)d\Omega.$$

Вынося за рамки интеграла в формуле (42) множители, не зависящие от частоты, получим промежуточное выражение

$$T_{eff}^2=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\left|\{\exp[-\psi_0^{[1]}\Omega\tau-\frac{1}{2}\psi_0^{[2]}\Omega^2\tau-j\varphi(\Omega)\tau]G(\Omega)\}\right|^2d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-2\psi_0^{[1]}\Omega-\psi_0^{[2]}\Omega^2)G^2(\Omega)d\Omega}. \tag{43}$$

Интересно, что за счет сокращений дроби в выражении (43) исчезла зависимость от постоянной составляющей функции затухания ψ_0. Иначе говоря, собственно затухание, не зависящее от частоты, не приводит к изменению эффективной длительности импульса, что представляется естественным.

Выполняя дифференцирование в числителе выражения (43) и предполагая, что $G(\Omega)$ – действительная функция, получаем после тождественных преобразований:

$$T_{eff}^2=\frac{\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-2\psi)\{[(\psi')^2+(\varphi')^2]G^2+(\psi')^2GG'+(G')^2\}d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-2\psi)G^2(\Omega)d\Omega}, \tag{44}$$

$$\psi = (\psi_0^{[1]}\Omega + \frac{1}{2}\psi_0^{[2]}\Omega^2)\tau\,, \quad \psi' = (\psi_0^{[1]} + \psi_0^{[2]}\Omega)\tau \quad , \quad \varphi' = -q_0^{[2]})\tau\Omega\,.$$

Из последней формулы следует, что даже в точке нулевой дисперсии, когда параметр, отвечающий за материальную дисперсию $q_0^{[2]} \approx 0$ возможен эффект уширения импульса за счет зависимости коэффициента затухания от частоты.

Заметим, что в формуле (44) при $\tau = 0$, т.е. при вводе импульса в ОВ, его длительность определяется:

$$T_{eff}^2(\tau = 0) = \int_{-\infty}^{\infty}(G')^2 d\Omega \Big/ \int_{-\infty}^{\infty}(G)^2 d\Omega\,,$$

откуда следует, что собственно приращение эффективной длительности импульса определяется:

$$\Delta T_{eff}^2 = T_{eff}^2(\tau > 0) - T_{eff}^2(\tau = 0) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-2\psi)\{[(\psi')^2 + (\varphi')^2]G^2 + (\psi')^2 GG'\}d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-2\psi)G^2(\Omega)d\Omega}\,. \qquad (45)$$

Формула (45) позволяет получать замкнутые аналитические выражения для уширения сигналов заданной формы и, в конечном итоге – числовые характеристики дисперсии с учетом зависимости коэффициента затухания и коэффициента преломления от частоты.

Заключение

Модели операторов дисперсии и согласованные с ними оптические сигналы могут представляться в разных математических формах. Фундаментальные физические закономерности обычно сложны для инженерных приложений. Упрощенные формулы расчетов типа формулы (1) применимы при весьма узких вариациях параметров. Представляется, что продуктивным является подход к моделированию явлений в оптическом волокне с использованием научно-методического аппарата теории сигналов и теории оптимальной фильтрации. Небольшое количество результатов в данном контексте показано в данной работе.

На самом деле, даже используемые в настоящее время упрощенные модели вида (1) позволяют, вообще говоря, исследовать дисперсионные эволюции импульсов различной тонкой структуры. Правда, при этом необходимо разделить рабочую полосу в области длин волн на более мелкие фрагменты, для каждого из них определить дисперсионный коэффициент, а для данного вида импульса определить распределение его энергии по длине волны.

Можно и так, но более прагматичным представляется подход, в котором исследуются зависимости дисперсионных эволюций сигнала от частоты. По крайней мере, в последнем случае можно призвать на помощь всю силу теории функций комплексного переменного.

Задача синтеза сигналов, устойчивых к дисперсии представляется неисчерпаемо актуальной. Понятно, что радикальными способами уменьшения дисперсии и, тем самым, увеличения протяженности регенерационных участков и пропускной способности каналов передачи данных, является совершенствование технологии изготовления оптического волокна. Однако, в Украине, как и в остальном мире уже проложено, что проложено. Поэтому представляет интерес решение задачи повышения эффективности волоконно-оптических систем передачи за счет формирования оптимальных оптических сигналов и за счет совершенствования методов их распознавания.

В заключение зададим пару вопросов, не требующих однозначного ответа.

Могут ли сами по себе аналитические преобразования улучшить качество связи? Пожалуй, нет. Могут ли теоретические исследования привести к более глубокому пониманию явлений, которые могут наблюдаться в оптической среде? Пожалуй, да. Но окончательную точку в ответах на эти вопросы все равно поставит кабельщик-спайщик, который может любую точку сварки превратить в неплохой аттенюатор.

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 848 с.

2. 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.

3. Стащук О.М. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на матеріальну дисперсію сигналу / О.М. Стащук, Д.М. Степанов, Д.Г. Багачук // Вісник Хмельницького Національного Університету – Хмельницький, 2015. – Вип. 6, С. 234 – 237.

4. Стащук О.М. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на хвилеводну дисперсію сигналу / Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. // Науковий журнал Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2016. – Вип. № 2 (125). – С. 157 – 160.

5. Багачук Д.Г. Компенсація поляризаційної модової дисперсії на основі одномодового оптичного волокна з анізотропними властивостями: дис. канд. техн. наук. – Одеса, 2015. – 160 с.

6. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика / Агравал Г. – М.: Мир, 1996. – 323 с.

7. Решетникова О.С. Оценка влияния фазовой самомодуляции на качество каналов ВОСП СРК с прямой модуляцией // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012, № 1 – Одеса, 2012. – С. 158-166.

8. Иванов М.Т. Радиотехнические цепи и сигналы / Иванов М.Т., Сергиенко А.Б., Ушаков В.Н. – СПб: Питер, 2014. – 336 с.

9. Одегов Н.А. Тестовые сигналы и показатели в задачах исследования материальной дисперсии // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017, № 1 – Одеса, 2017. – с. 124-131.

10. Корнейчук В.И. Оптические системы передачи / Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П. – К: Техніка, 1994. – 388 с.

11. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Элементарные функции. – М: Наука, 1981. – 800 с.

12. Ч.Чук, М.Бернефельд. Радиолокационные сигналы. Теория и применение. – М.: Сов. Радио, 1971. – 568 с.

13. Решетняк Г.Ю. Теоремы устойчивости в геометрии и анализе. – Наука, Сибирское отделение, 1982. – 228 с.

14. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. – М.: Советское радио, 1970. – 376 с.

References

1. Landsberg G.S. Optika. – M.: FIZMATLIT, 2003. – 848 s.

2. Bondarenko O.V. Volokonno-opticheskie kabeli. Teoreticheskie osnovy, konstruirovanie s raschet, tehnologija proizvjdstva I ekspluatacija: monographija. / O.V. Bondarenko, D.V. Iorgachev, A.F. Danchenko, A.V. Usov. – Odessa, Astroprint, 2000. – 536 s.

3. Stashuk O.M. Vplyv hivichnogo skladu skla optychnogo volokna na materialnu dyspersiju sygnalu / O.M. Stashuk, D.M. Stepanov, D.G. Bagachuk // Visnyk Hmelnickogo Nacionalnogo Universytetu . – Hmelnickij, 2015. – Vyp. 6, S. 234– 237.

4. Stashuk O.M. Vplyv hivichnogo skladu skla optychnogo volokna nahvylevodnu dyspersiju sygnalu / O.M. Stashuk, D.M. Stepanov, D.G. Bagachuk // Naukovyj ghurnal Visnyk Vinnyckogo politehnichnogo instytutu. – Vinnycja, 2016. – Vyp. 6 (125), S. 157– 160.

5. Bagachuk D.G. Kompensacija poljaryzacijnoji modovoji dyspersiji na osnovi odnomodovogo optycnogo volokna z anizatropnymy vlastyvostjamy: dys. kand. tehn. nauk. – Odesa, 2015. – 160 s.

6. Agraval G. Nelinejnaja volokonnaja optika / Agraval G. – M.: Mir, 1996. – 323 s.

7. Reshetnikova O.S. Ocenka vkijanija fazovoj samomoduljacii na kachestvo kanalov VOSP SRK s prjamoj moduljaciej // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova, 2012, № 1 – Odesa, 2012. – S. 158-166.

8. Ivanov M.T. Radiotehnicheskie cepi i sygnaly / Ivanov M.T., Sergienko A.B., Ushakov V.N. – SPb: Piter, 2014. – 336 s.

9. Odegov N.A. Testovye signaly I pokazateli v zadachah issledovanija materialnoj dispersii // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova, 2017, № 1 – Odesa, 2017. – S. 124-131.

10. Kornejchuk V.I. Opticheskie systemy peredachi / Kornejchuk V.I., Makarov T.V., Panfilov I.P. – K: Tehnika, 1994. – 388 s.

11. Prudnikov A.P., Brychkov J.A., Marichev O.I. Integraly I rjady. Elementarnyji funkciji. – M., Nauka, 1981. – 800 s.

12. C. Cukh, M. Bernefeld. Radiolokacionnye sygnaly. Teorija i primenenie. . – M.: Sov. Radio, 1971. – 568 s.

13. Reshetnjak G.Y. Teoremy ustojchivosti v geometrii i analize. – Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1982. – 228s.

14. Varakin L.E. Teorija slozhnyh sygnalov. . – M.: Sovetskoe radio, 1970. – 376 s.

Рецензія/Peer review : 19.07.2017 р. Надрукована/Printed :30.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

УДК 677.055

В.Г. ЗДОРЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну
Н .М. ЗАЩЕПКІНА
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ В'ЯЗАННЯ В'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН ТА ШЛЯХИ ЇХ ЗНИЖЕННЯ

Механізм в'язання відноситься до найбільш відповідального механізму в'язальних машин. Ефективність його роботи залежить від динамічних навантажень, що виникають в результаті ударної взаємодії голок з клинами в'язальних систем. Як показують дослідження, ударна взаємодія голок з клинами призводить до передчасних відмов голок і, як наслідок, до зниження працездатності в'язальних машин та погіршення якості трикотажного полотна. Враховуючи вище сказане, актуальним питанням легкого машинобудування є вирішення проблеми зниження динамічних навантажень механізму в'язання. В результаті виконаних досліджень встановлено, що одним із ефективних шляхів зниження динамічних навантажень механізму в'язання є удосконалення процесу змащення пари «голка – клин». Результати досліджень можуть бути використані в ході розробки нових моделей в'язаних машин.

Ключові слова: механізм в'язання, в'язальна машина, динамічні навантаження механізму в'язання, динаміка взаємодії голки з клином, зниження динамічних навантажень пари «голка – клин».

V.G. ZDORENKO
Kyiv National University of Technology and Design
N.N. ZASHCHEPKINA
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DYNAMIC LOADS OF KNITTING MACHINES AND WAYS TO REDUCE THEM

The knitting mechanism refers to the most important mechanism of knitting machines. The effectiveness of its work depends on the dynamic loads that arise as a result of impact interaction of needles with wedges of knitting systems. As research shows, the shock interaction of needles with wedges leads to premature needle failures and, as a consequence, to a decrease in the working capacity of knitting machines and to a deterioration in the quality of knitted fabrics. In view of the foregoing, the current issue of light engineering is to solve the problem of reducing the dynamic loads of the knitting mechanism. As a result of the performed studies, it has been established that one of the effective ways to reduce the dynamic loads of the knitting mechanism is to improve the process of lubrication of the needle-wedge pair. The results of the research can be used to develop new models of knitted machines.

Keywords: knitting mechanism, knitting machine, dynamic loads of knitting mechanism, dynamics of needle-wedge interaction, reduction of dynamic loads of needle-wedge pair.

Перспективним напрямком підвищення ефективності роботи в'язальних машин, є удосконалення їх механізмів, зокрема механізму в'язання полотна [1–10]. Дослідження [1, 2, 4, 5–10] показують, що продуктивність в'язальних машин та якість трикотажного полотна суттєво залежать від ефективності роботи механізму в'язання, що обумовлено динамічними навантаженнями, які виникають в результаті ударної взаємодії голок з клинами. Зниження динамічних навантажень механізму в'язання може бути досягнуто як удосконаленням конструкцій робочих органів, зокрема голок та клинів [5], так і вибором раціонального режиму роботи в'язальних машин [1, 2].Таким чином проблема підвищення ефективності роботи механізмів в'язання в'язальних машин є однією із актуальних проблем легкого машинобудування. Для розв'язання цієї проблеми важливим є оцінка динамічних навантажень механізму в'язання та розробка шляхів їх зниження.

Об'єкт та методи дослідження. Об'єктом досліджень обрано динамічні навантаження механізму в'язання в'язальних машин та шляхи їх зниження. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи теорії проектування машин легкої промисловості та теорії динаміки механічних систем з пружними в'язями.

Постановка завдання. Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності роботи механізму в'язання в'язальних машин (підвищення продуктивності в'язальних машин та якості трикотажного полотна), стаття присвячена аналізу динаміки в'язальних механізмів та методу зниження динамічних навантажень, що виникають в них в результаті ударної взаємодії голок з клинами.

Результати та їх обговорення. В результаті аналізу роботи механізмів в'язання в'язальних машин [4, 5] встановлено, що основною причиною низької ефективності їх роботи є відмова голок, зумовлена значними динамічними навантаженнями, що виникають в результаті ударної взаємодії голок з клинами. Встановлено також, що одним з факторів, що визначають величину динамічних навантажень в механізмах в'язання (сила удару голки об клин), є величина сил терня в кінематичних парах «голка – клин» і «голка – штеги».

В практиці використання в'язальних машин відомі в основному два типи механізмів в'язання: механізм в'язання з жорстким кріпленням клинів та механізм в'язання, де клини мають пружні робочі елементи, або клини з пружним кріпленням.

Розглянемо динаміку вказаних механізмів в'язання. При цьому в якості розрахункових можна вибрати одномасову (для першого випадку) або двомасову динамічну моделі (для другого випадку) [3–5].

У разі жорсткого кріплення клина максимальна величина сили удару (горизонтальна складова) голки об клин визначається з рівняння [4]:

$$P_{max} = V\sqrt{\frac{mC}{K}}tg\alpha + \frac{F}{K}, \quad (1)$$

де P_{max} — максимальна сила удару п'ятки голки об клин;

V – колова швидкість голки (голкового циліндру в'язальної машини);

m – маса голки;

C – приведена жорсткість пари «голка – клин» в зоні удару,

$$C = \frac{C_x C_y}{C_x + C_y tg\alpha}; \quad (2)$$

C_x, C_y – жорсткість пари «голка – клин» відповідно у напрямі осей координат X і $У$;

F – технологічне навантаження голки, зумовлене процесом в'язання полотна;

K – конструктивний параметр в'язальної системи механізму в'язання,

$$K = ctg(\alpha + \rho) - \frac{2a+b}{b}tg\rho_1; \quad (3)$$

α – кут зустрічі голки з клином при ударі (кут клина);

ρ – кут тертя пари «голка – клин», $\rho = arctg\, f$;

f – коефіцієнт тертя пари «голка – клин»;

a – плече сили удару п'ятки голи об клин;

b – плече опорної реакції голки (глибина голкового паза);

ρ_1 – кут тертя пари «голка – направляючі голки (штеги)», $\rho_1 = arctg\, f_1$;

f_1 – коефіцієнт тертя пари «голка – штеги».

Оскільки матеріал пар «голка – клин» та «голка – штеги» однакові (сталь), приймаємо $\rho = \rho_1$.

Тоді вирах (3) приймає вид:

$$K = ctg(\alpha + \rho) - \frac{2a+b}{b}tg\rho. \quad (4)$$

Як видно з приведеного (4) процес змащення (вид мастильного матеріалу та спосіб подачі мастила в зону тертя) пар «голка – клин» і «голка – штеги» сприяє зниженню коефіцієнта тертя в цих парах, що позначається на конструктивному параметрі K, а отже і на величині сили удару голки об клин.

Розглянемо ефективність впливу змащення на зниження динамічних навантажень механізму в'язання на прикладі круглов'язальної машини КО-2 [6]. При цьому в якості вихідних параметрів приймаємо [4, 5]:

$V = 1{,}1$ м/с; $\alpha = 56^0$; $m = 0{,}477 \cdot 10^{-3}$ кг; $C = 824{,}5$ Н/м; $a = 1{,}5$ мм; $b = 3{,}8$ мм; $F = 0{,}17$ Н.

Припускаючи, що під впливом мастила кут терня змінюється в межах від 3^0 до 12^0 (за умови $\rho > 12{,}45^0$ $K < 0$, що призводить до заклинювання голки), за допомогою ЕОМ отримані величини конструктивного параметра K та максимальної сили удару голки об клин P_{max}. При цьому інтервал варіювання кута тертя прийнятий $\Delta\rho = 0{,}5^0$.

Результати розрахунків представлені в табл. 1.

Розглянемо динаміку механізму в'язання в'язальної машини з клинами з пружними елементами або при пружному їх кріпленні. В цьому випадку в якості розрахункової слід прийняти двомасову динамічну модель механізму в'язання.

Оскільки на другу масу системи (маса клину) навантаження в початковий момент не діє, маса m_2 приходить в рух одночасно з моментом взаємодії голки з клином. При цьому динамічні умови рівноваги мас системи мають вигляд:

$$m_1\ddot{S}_1 = F_1 + F_2 - C_1(S_1 - S_2); \quad m_2\ddot{S}_2 = F_3 + C_1(S_1 - S_2) - C_2 S_2, \quad (5)$$

де m_1, m_2 – приведені маси відповідно голки та клину;

F_1, F_2, F_3 — приведені: технологічне навантаження, що діє на голку; сила опору руху голки в пазу циліндра, обумовлена тертям; статичне навантаження на клин, викликане тиском п'яток голок;

C_1, C_2 – приведені жорсткість відповідно пари «голка – пружнй елемент клину» та пружний елемент клину;

$$F_2 = \lambda C_1(S_1 - S_2)tg(\alpha + \rho_1); \qquad \lambda = \frac{2a+b}{b}\mu_2. \quad (6)$$

Таблиця 1

Результати розрахунків впливу ефективності змащення пари «голка – клин» на величину сили удару голки об клин

Кут тертя пари «голка – клин» ρ, град	Коефіцієнт тертя пари «голка – клин» f	Конструктивний параметр K	Максимальна сила удару голки об клин P_{max}, Н
3,0	0,052	0,507	45,753
3,5	0,061	0,480	47,055
4,0	0,070	0,452	48,469
4,5	0,078	0,425	50,013
5,0	0,087	0,398	51,708
5,5	0,096	0,378	53,581
6,0	0,105	0,344	55,666
6,5	0,114	0,317	58,008
7,0	0,123	0,290	60,663
7,5	0,132	0,263	63,711
8,0	0,140	0,236	67,260
8,5	0,149	0,210	71,464
9,0	0,158	0,183	76,556
9,5	0,167	0,156	82,901
10,0	0,176	0,130	91,115
10,5	0,185	0,103	102,346
11,0	0,194	0,077	119,045
11,5	0,203	0,050	147,822
12,0	0,212	0,024	217,434

Тоді:

$$m_1\ddot{S}_1 = F_1 - \psi C_1(S_1 - S_2); \qquad m_2\ddot{S}_2 = F_3 + C_1(S_1 - S_2) - C_2 S_2, \tag{7}$$

Де:

$$\psi = 1 - \lambda\, tg(\alpha + \rho_1). \tag{8}$$

Враховуючи, що:

$$C_1(S_1 - S_2) = P_1;\ C_2 S_2 = P_2, \tag{9}$$

можна записати:

$$m_1\ddot{S}_1 = F_1 - \psi P_1; \qquad m_2\ddot{S}_2 = F_3 + P_1 - P_2, \tag{10}$$

де P_1, P_2 – динамічні навантаження в пружних в'язях механізму, відповідно C_1 і C_2.

Підставляючи параметри $\ddot{S}_1$ і $\ddot{S}_2$, отримані із (10), у вирази

$$\ddot{P}_1 = C_1(\ddot{S}_1 - \ddot{S}_2); \qquad \ddot{P}_2 = C_2\ddot{S}_2, \tag{11}$$

знаходимо:

$$\ddot{P}_1 = \frac{C_1}{m_1}\left[P_2 - \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\psi\right)P_1 + \frac{m_2}{m_1}F_1 - F_3\right];\ \ \ddot{P}_2 = \frac{C_2}{m_2}(F_3 + P_1 - P_2). \tag{12}$$

Оскільки навантаження F_1 і F_3 є постійними, розв'язок системи рівнянь (12) має вигляд [5]:

$$\begin{aligned} P_1 &= A_{11}\cos\beta_1 t + A_{12}\cos\beta_2 t + B_{11}\sin\beta_1 t + B_{12}\sin\beta_2 t + \frac{F_1}{\psi}; \\ P_2 &= A_{21}\cos\beta_1 t + A_{22}\cos\beta_2 t + B_{21}\sin\beta_1 t + B_{22}\sin\beta_2 t + \frac{F_1}{\psi} + F_3, \end{aligned} \tag{13}$$

де A, B – постійні інтегрування;

β – циклова частота зміни навантаження;

a – постійна складова динамічного навантаження,

$$a_1 = \frac{F_1}{\psi}; \qquad a_2 = \frac{F_1}{\psi} + F_3. \tag{14}$$

Постійні інтегрування можуть бути визначені по відомій методиці [4, 5]:

$$A_{11} = \frac{\frac{C_1}{m_2} - \Delta_2}{z}\cdot\frac{F_1}{\psi}; \quad A_{12} = \frac{\Delta - \frac{C_1}{m_2}}{z}\cdot\frac{F_1}{\psi}; \quad A_{21} = A_{11}\frac{m_2}{C_1}\Delta_1; \quad A_{22} = A_{12}\frac{m_2}{C_1}\Delta_2;$$

$$B_{11}=\frac{C_1\upsilon\ \Delta_2}{\beta_1 z};\quad B_{12}=-\frac{C_1\upsilon\ \Delta_1}{\beta_2 z};\quad B_{21}=B_{11}\frac{m_2}{C_1}\Delta_1;\quad B_{22}=B_{12}\frac{m_2}{C_1}\Delta_2, \tag{15}$$

$$\Delta_1=\gamma-\beta_1^2;\ \Delta_2=\gamma-\beta_2^2;\qquad \gamma=C_1\frac{m_1+\psi m_2}{m_1 m_2};\ z=\beta_1^2-\beta_2^2. \tag{16}$$

Циклові частоти коливання мас двомасової системи, як відомо [4, 5], визначаються із рівняння:

$$\beta_{1,2}^2=\frac{C_1(m_1+\psi\ m_2)+C_2 m_1\pm\sqrt{[C_1(m_1+\psi\ m_2+C_2 m_1)]^2-4\psi\ C_1C_2m_1m_2}}{2m_1m_2}. \tag{17}$$

З метою спрощення знаходження максимуму навантажень в гнучких в'язях системи, проведемо складання коливань однакової частоти [5]. Тоді рівняння (13) приймуть вигляд:

$$P_1=D_{11}\,sin(\beta_1 t+\varphi_1)+D_{12}\,sin(\beta_2 t+\varphi_2)+\alpha_1;$$
$$P_2=D_{21}\,sin(\beta_1 t+\varphi_1)+D_{22}\,sin(\beta_2 t+\varphi_2)+\alpha_2, \tag{18}$$

Тут

$$D_{11}=\sqrt{A_{11}^2+B_{11}^2};\quad D_{12}=\sqrt{A_{12}^2+B_{12}^2};\ D_{21}=\sqrt{A_{21}^2+B_{21}^2};\quad D_{22}=\sqrt{A_{22}^2+B_{22}^2}; \tag{19}$$

$$\varphi_1=arctg\frac{A_{11}}{B_{11}};\quad \varphi_2=arctg\frac{A_{12}}{B_{12}}. \tag{20}$$

Очевидно:

$$P_{1max}=D_{11}+D_{12}+\alpha_1;\ P_{2max}=D_{21}+D_{22}+\alpha_2. \tag{21}$$

Враховуючи, що $P_1=Pctg(\alpha+\rho_1)$ [5], остаточно знаходимо:

$$P_{1max}=(D_{11}+D_{12}+a_1)tg(\alpha+\rho_1);\qquad P_{2max}=D_{21}+D_{22}+\alpha_2, \tag{22}$$

де P_{1max} – максимальна величина динамічного навантаження (горизонтальна складова), що виникає в зоні удару голки об клин.

Висновки. Аналіз отримання результатів показує:

- зі збільшенням кута тертя (погіршуються умови змащення) сила удару голки об клин збільшується. При цьому в зоні зміни кута тертя від 3^0 до 9^0 (зміна коефіцієнту тертя від 0,05 до 0,16) максимальна сила удару голки об клин з жорстким кріпленням збільшується незначно, в 1,67 рази;
- подальше збільшення кута тертя призводить до різкого збільшення сили удару голки об клин. Збільшення кута тертя від 9^0 до 12^0 (зміна коефіцієнту тертя від 0,16 до 0,21) призводить до збільшення сили удару в 2,84 разу;
- при куті тертя $\rho>12{,}45^0$ конструктивний параметр K стає негативним, що призводить до заклинювання голки $(F_{max}\to\infty)$ і, природно, до її поломки;
- найбільш ефективним режимом змащення механізму в'язання, на наш погляд, є такий режим, за якого коефіцієнт тертя пар «голка – клин» та «голка – штеги» не перевищує 0,1 ($\rho\le 5{,}7^0$). Максимальна сила удару голок об клини круглов'язальних машин типу КО при цьому не перевищує 54,75 Н.

Література

1. Повышение надежности трикотажного оборудования / [Пипа Б.Ф., Волощенко В.П., Шипуков С.Т., Орлов В.А.]. – К. : Техніка, 1983. – 111 с.
2. Хомяк О.Н. Повышение эффективности работы в'язальных машин / Хомяк О.Н., Пипа Б.Ф. – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 208 с.
3. Піпа Б.Ф. Динаміка круглов'язальних машин / Піпа Б.Ф., Хомяк О.М., Павленко Г.І. – К. : КНУТД, 2005. – 294 с.
4. Піпа Б.Ф. Динаміка механізмів в'язання круглов'язальних машин / Піпа Б.Ф. – К. : КНУТД, 2008. – 416 с.
5. Піпа Б.Ф. Удосконалення робочих органів механізмів в'язання круглов'язальних машин / Піпа Б.Ф., Плешко С.А. – К. : КНУТД, 2012. – 470 с.
6. Машины кругловязальные типа КО-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Черновцы. 1992. – 86 с.
7. Защепкіна Н.М. Підвищення стабільності відтяжки полотна круглов'язальної машини / Н.М. Защепкіна, Б.Ф. Піпа // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 3. – С. 84–86.
8. Защепкіна Н.М. Вплив конструкції системи гальмування круглов'язальної машини на ефективність роботи та вибір її параметрів / Н.М. Защепкіна, В.Г. Здоренко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – № 2. – С. 63–66.
9. Здоренко В.Г. Ефективність використання відцентрової фрикційної муфти для зниження динамічних навантажень в приводі в'язальних машин / В.Г. Здоренко, Н.М. Защепкіна // Вісник КНУТД. – 2016. – № 2 (96). – С. 34–40.

10. Защепкіна Н.М. Інженерні методи проектування заданих властивостей матеріалів : монографія / Защепкіна Н.М. – Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2016. – 207 с.

References

1. Pipa B.F., Voloshenko V.P., Shipukov S.T., Orlov V.A. Improving the reliability of knitting equipment. - K .: Technics, 1983. - 111 p.

2. Khomyak O.N., Pipa B.F. Improving the efficiency of knitting machines. - M .: Legprombytizdat, 1990. - 208 p.

3. Pipa B.F., Khomyak O.M., Pavlenko G.I. Dynamics of circular knitting machines. - K: KNUTD, 2005. - 294 p.

4. Pipa B.F. Dynamics of knitting machines of circular knitting machines. - To: KNUTD, 2008. - 416 p.

5. Pipa B.F., Pleshko S.A. Improvement of working bodies of mechanisms of knitting circular knitting machines. - K.: KNUTD, 2012. - 470 p.

6. Circular knitting machines KO-2 type. Technical description and operating instructions. - Chernivtsi 1992. - 86 p.

7. Zashchepkina N. N., Pipa F. Increase the stability of the fabric Kruglov azalina machine // Bulletin of KNU. – 2013. – No. 3. – P. 84 – 86.

8. Zashchepkina N.M., Zdorenko V.H. Effect braking system design kruhlov'yazalnoyi machine on efficiency and choice of parameters Herald of Khmelnytsky National University. № 2. 2017. - P. 63-66.

9. Sdorenko V. G., Zashchepkina N.N. Efektivnost ispolzovaniya chenrtobezhnoj mufti dlya snizheniya dinamicheskikh nagruzok v privode vyazalnikh mashin // Vesnik KNUT. – 2016. - № 2 (96). – P. 34-40.

10. Zashchepkina N.M. Engineering design methods specified properties monograph. Ltd. "Nilan-Ltd", Vinnitsa. - 2016. – 207 p.

Рецензія/Peer review : 15.07.2017 р. Надрукована/Printed :31.10.2017 р.
Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією

ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

УДК 521.1:523.2:523.6:523.9:524.6:524.8:532.5.01:534.1:621.891

Ю.П. ЗАСПА
Хмельницький національний університет, e-mail: zaspa_yuriy@ukr.net

КОНТАКТНЕ ДИНАМО ЯК ГЕНЕРАТОР КОГЕРЕНТНИХ (КООПЕРАТИВНИХ) КОСМІЧНИХ ФОРМ РУХУ ТА ДЖЕРЕЛО ПЛАНЕТАРНОЇ, СОНЯЧНОЇ, ГАЛАКТИЧНОЇ І МЕТАГАЛАКТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ. ЧАСТИНА VIII

На основі співвідношень контактної електромагнітної гідродинаміки (КЕМГД), альтернативної щодо відомої магнітної гідродинаміки (МГД), розглянуті механізми контактної генерації електромагнітного поля в космічних системах. Основна увага приділяється математичному оформленню ключової ролі колективних процесів в динаміці систем. Запропоноване гідродинамічне рівняння внутрішніх інерційних хвиль, яке містить в якості базового параметра кооперативну в'язкість, що описує процеси дисипації та енергетичної накачки в окрему хвильову моду з врахуванням діючих зворотних зв'язків у всій системі. Розглянуті «динамічні кооперативи» контактно-наведених інерційних хвиль в системі Земля – Місяць та в Сонячній системі. Показано, що найтривалішому геодинамічному циклу з періодом 700–800 мільйонів років відповідають внутрішні інерційні хвилі з довжиною середньої орбіти Місяця. Інтерференція цих хвиль в тілі Землі обумовлює глобальний рух континентів та плюм-тектонічну активність земних надр, що відкидає поширений конвективний сценарій глибинної геодинаміки. Встановлено, що глобальні (в масштабах Сонячної кулі) та локальні (комірки грануляції та надгрануляції, гігантські комірки, спікули, філаменти, протуберанці та ін.) геліодинамічні структури руху описуються спільним параметром кооперативної в'язкості. У цьому контексті стверджується, що назва «конвективна зона» Сонця є неадекватною, оскільки хибно відносить на рахунок конвекції динамічні процеси суто хвильового характеру. Відмічено, що дисипація енергії глобальних інерційних хвиль та локалізованих когерентних структур руху в процесах їх взаємної трансформації пояснює з-поміж іншого «аномально високу» температуру Сонячної корони. Як окремий вид дисипації енергії того чи іншого «динамічного кооперативу» розглядається контактно-обумовлене витікання речовини та електромагнітного поля за його межі, що веде до формування космічних систем значно більших просторових масштабів (Сонячної системи та геліосфери, галактичних систем, Метагалактики). В катастрофічних випадках воно завершується повним динамічним самознищенням материнської системи (вибухи наднових зір). Показано, що границі короткохвильових кластерів у спектрах космічних променів надвисоких енергій обумовлені не відомим ефектом Грейзена – Зацепіна – Кузьміна, а значеннями кооперативної в'язкості (і відповідними їм значеннями магнітної в'язкості) галактичних ядер, а також відношенням групової швидкості інерційних хвиль в генеруючих контактних розривах ядер до швидкості світла у вакуумі. Стверджується, що це відношення для космічних променів надвисоких енергій значно перевищує одиницю. Підкреслена топологічна спільність гідродинамічного поля швидкостей і вектор-потенціалу електромагнітного поля в провідному середовищі космічних систем. На противагу до відомих концепцій МГД, джерелом електромагнітного поля в цих системах вважаються не струми провідності, а поверхневий ротор вектор-потенціалу (для магнітної компоненти поля) і часова зміна вектор-потенціалу в генеруючи контактах (для електричної компоненти). При цьому збереження топології контактно-згенерованих когерентних структур руху в космічних системах забезпечується збереженням гідродинамічної та магнітної спіральності не у виділених Лагранжевих областях середовища (як це постулюється в МГД), а у виділених Ейлерових областях простору, що фактично «розморожує» магнітне поле та гідродинамічне поле завихореності, формуючи хвильові структури. Встановлені динамічні аналогії катастроф у технічних (енергетичних) та космічних системах за участю контактно-наведених інерційних хвиль. Розглядається гідродинамічно-флаттерний сценарій вибухів нових та наднових зір. В якості технічного аналога наводиться відома катастрофа на СШГЕС в серпні 2009 р. Відмічено, що хронічні невдачі МГД у забезпеченні керованого термоядерного синтезу обумовлені, з-поміж іншого, неврахуванням механізмів генерації когерентних пакетів інерційних та електромагнітних хвиль у плазмі. Як приклад наводиться периферійний зрив реакції синтезу на термоядерному реакторі JET в жовтні 1997 р.

***Ключові слова**: контактне динамо, космічна система, інерційні хвилі, динамічний кооператив, кооперативна в'язкість, магнітна в'язкість, контактна електромагнітна гідродинаміка, магнітна гідродинаміка, глибинна геодинаміка, плюм-тектоніка, геліодинаміка, конвективна зона, космічні промені, топологія, спіральність, флаттер, катастрофа, СШГЕС, термоядерний реактор JET.*

YU. P. ZASPA
Khmelnytsky National University, e-mail: zaspa_yuriy@ukr.net

CONTACT DYNAMO AS A GENERATOR OF THE COHERENT (CO-OPERATIVE) SPACE FORMS OF MOTION AND A SOURCE OF THE PLANETARY, SOLAR, GALACTIC , AND METAGALACTIC ENERGY AND ELECTROMAGNETISM. PART VIII

On the basis of the relations of contact electromagnetic hydrodynamics (CEMHD), an alternate relatively known magnetic hydrodynamics (MHD), mechanisms of contact generation of an electromagnetic field in space systems are considered. The main attention is paid to the mathematical design of the key role of collective processes in the dynamics of systems. The proposed hydrodynamic equation of internal hydrodynamic waves, which contains as a basic parameter co-operative viscosity, describes the processes of dissipation of energy and pumping in a separate wave mode, taking into account the existing feedback bonds throughout the system. The "dynamic co-operatives" of contact-induced inertial waves in the system of the Earth-Moon and in the Solar system are considered. It is shown that the longest geodynamic cycle with a period of 700-800 million years corresponds to inertial waves with the length of the middle orbit of the Moon. The interference of these waves in the Earth's body causes the global motion of the continents and the plume-tectonic activity of the earth's interior, which rejects the common convective scenario of hypogene geodynamics. It has been established that global (on the scale of the Solar Ball) and local (granulation and supergranulation cells, giant cells, spicules, filaments, prominences, etc.) heliodynamic structures of motion are described by a common parameter of co-operative viscosity. In this context it is argued that the name "convection zone" of the Sun is inadequate, as it falsely attributes dynamic processes of a wave nature to the account of convection. It is noted that the dissipation of the energy of global inertial waves and localized coherent structures of motion in the processes of their mutual transformation explains, among other things, the "abnormally high" temperature of the Solar Corona. As a separate type of energy dissipation of a "dynamic co-operative", the contact-caused leakage of matter and the electromagnetic field beyond its boundary is considered, which leads to the formation of space systems of considerably larger spatial scales (Solar System and Heliosphere, Galactic Systems, Metagalaxy). In catastrophic cases, it ends with a complete dynamic self-destruction of the maternal system (an explosion of supernovae). It is shown that the boundaries of short-wave clusters in the spectra of cosmic rays of ultrahigh energies are not due to the effect of Greisen-Zatsepin-Kuzmin, but the values of the co-operative viscosity (and their corresponding values of magnetic viscosity) of galactic nuclei, as well as the ratio of the group speed of inertial waves in generating contact ruptures of the nuclei and the speed of light in a vacuum. It is argued that this ratio for ultra-high energy cosmic rays is significantly higher than unit one. The topological commonality of the hydrodynamic field of velocities and the vector-potential of the electromagnetic field in the conducting medium of space systems is emphasized. In contrast to the well-known MHD concepts, the sources of electromagnetic fields in these systems are not conduction currents, but the surface rotor of the vector potential (for the magnetic component of the field) and the time-varying vector-potential in the generating contacts (for the electrical component). Moreover, the conservation of the topology of contact-generated coherent structures of motion in cosmic systems is ensured by the preservation of hydrodynamic and magnetic helicity not in the isolated Lagrangian regions of the medium (as posited in MHD), but in the allocated Euler regions of the space that actually "defrosts" the magnetic field and the hydrodynamic vorticity field, forming wave structures. Dynamic analogies of disasters in technical (energy) and space systems with the help of contact-induced inertial waves are established. The hydrodynamic-flutter scenario of explosions of new and supernovae stars is considered. As a technical analogue, a well-known catastrophe at the Sayano-Shushenskaya Dam is reported in August, 2009. It is noted that chronic failures in MHD in providing controlled thermonuclear fusion are due to failure of the mechanisms of generating coherent packets of inertial and electromagnetic waves in plasma. As an example, the peripheral failure of the synthesis reaction on the JET thermonuclear reactor in October 1997 is presented.

Key words: contact dynamo, space system, inertial waves, dynamic co-operative, co-operative viscosity, magnetic viscosity, contact electromagnetic hydrodynamics, magnetic hydrodynamics, hypogene hydrodynamics, plume tectonics, heliodynamics, convection zone, cosmic rays, topology, helicity, flutter, catastrophe, the Sayano-Shushenskaya Dam, the JET thermonuclear reactor.

Вступ

Нижче наводяться результати аналізу механізмів контактної генерації електромагнітного поля в космічних системах, отримані на основі запропонованої раніше [1] концепції контактної електромагнітної гідродинаміки (КЕМГД), що є прямою альтернативою відомої магнітної гідродинаміки (МГД) [2–6]. Остання, як вже зазначалось [1], демонстративно ігнорує струм зміщення (змінне в часі електричне поле) в рівняннях Максвелла та ґрунтується на ідеях Дж. Лармора та Х. Альфвена щодо генерації магнітного поля конвективними рухами плазми та т.з. «вмороженості» магнітного поля у високопровідне середовище (відповідно) [2–6]. Як буде показано нижче, обидві ці базові ідеї МГД в дійсності виявились хибними, що власне й пояснює повну неспроможність магнітної гідродинаміки як науки пояснити механізми генерації електромагнітного (а не лишень магнітного) поля в космічних системах.

Основна увага в даній роботі приділяється математичному оформленню ключової ролі колективних процесів в динаміці технічних та космічних систем.

Рівняння Максвелла без штучних укорочень МГД

Продовжуючи розпочатий раніше [1] аналіз системи рівнянь Максвелла із збереженням струму зміщення, запишемо відповідні співвідношення для електромагнітного поля у електронейтральному рухомому провідному середовищі ($\rho_e = 0$, де ρ_e – густина електричного заряду):

$$\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla}\varphi\,,\ \vec{B} = rot\vec{A} \qquad (1, 2)$$

$$rot\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\,,\ rot\vec{B} = \frac{4\pi\mu}{c}\vec{j} + \frac{\varepsilon\mu}{c}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad (3, 4)$$

$$\vec{\nabla}\vec{E} = 0\,,\ \vec{\nabla}\vec{B} = 0 \qquad (5, 6)$$

Тут $\vec{A}$, φ – векторний та скалярний потенціали електромагнітного поля,

$\vec{E}$, $\vec{B}$ – відповідно напруженість електричного та індукція магнітного поля,

$\vec{j}$ – густина електричного струму, ε , μ – відносна діелектрична та відносна магнітна проникності (ізотропного) середовища, c – швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі.

Для електронейтрального середовища конвективна компонента густини струму зануляється ($\rho_e \cdot \vec{\upsilon} = 0$, де $\vec{\upsilon}$ – швидкість елементу рухомого середовища), залишаючи в $\vec{j}$ лише струм провідності $\vec{j}_c$, густина якого стандартно виражається через $\vec{E}$, $\vec{B}$ та $\vec{\upsilon}$ [2–6]:

$$\vec{j} = \vec{j}_c = \sigma\left(\vec{E} + \frac{1}{c}\left[\vec{\upsilon} \times \vec{B}\right]\right), \tag{7}$$

де σ – електропровідність середовища, яка у використаній тут Гаусовій системі одиниць має розмірність частоти (сек$^{-1}$).

На основі співвідношень (1–7) неважко отримати наступне рівняння для потенціалів електромагнітного поля:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla}(c\varphi) - \left[\vec{\upsilon} \times rot\vec{A}\right] = \nu_m\left(\Delta\vec{A} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2}\right), \tag{8}$$

де ν_m – так звана магнітна в'язкість [2–6]:

$$\nu_m = \frac{c^2}{4\pi\mu\sigma}. \tag{9}$$

При виводі рівняння (8) використана наступна калібрувальна умова для потенціалів поля:

$$\vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}\vec{A} + \frac{\varepsilon\mu}{c}\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right) = 0. \tag{10}$$

Ця умова не ідентична відомому Лоренцевому калібруванню потенціалів, що зануляє вираз під градієнтом у (10), а не сам градієнт [7, 8].

Взявши ротор від обох частин рівняння (8), отримаємо:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - rot\left[\vec{\upsilon} \times \vec{B}\right] = \nu_m\left(\Delta\vec{B} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}\right). \tag{11}$$

Це рівняння суттєво відрізняється від базового рівняння МГД [2–6] саме останнім членом у правій частині, що прямо враховує струм зміщення, проігнорований у МГД.

Гідродинамічні рівняння Ейлера, Нав'є – Стокса та рівняння внутрішніх інерційних хвиль у кооперативній динамічній системі

Леонард Ейлер, відокремивши більш як два з половиною століття тому [9] конвективну похідну від субстанціональної в рівнянні другого закону Ньютона для руху елемента суцільного середовища, тим самим в якісному відношенні різко відділив цей елемент від окремої матеріальної точки, для якої конвективна похідна відсутня, а частинна похідна швидкості за часом просто співпадає з повною похідною, тобто з прискоренням. Ця різниця недооцінена тими теоретиками, які намагаються звести матеріальне середовище до простої сукупності матеріальних точок, «відірваних від колективу». В протилежність до цього запишемо наступне гідродинамічне рівняння руху матеріального середовища:

$$\frac{\partial \vec{\upsilon}}{\partial t} + \left(\vec{\upsilon} \cdot \vec{\nabla}\right)\vec{\upsilon} = \ldots + \nu_{co} \cdot \left(\Delta\vec{\upsilon} - \frac{1}{\upsilon_{ph}^{\ 2}}\frac{\partial^2 \vec{\upsilon}}{\partial t^2}\right). \tag{12}$$

Ліва частина цього рівняння, що містить, по суті, інерційні складові, взята з рівняння Ейлера. Права – за формою першого члена – з рівняння Нав'є – Стокса, що містить відому комбінацію з двома в'язкостями (першою η та другою ζ) [9]:

$$\nu\Delta\vec{\upsilon} + \frac{1}{\rho}(\zeta + \eta/3)\vec{\nabla}\left(\vec{\nabla} \cdot \vec{\upsilon}\right), \tag{13}$$

де $\nu = \eta/\rho$ – кінематична в'язкість, ρ – густина середовища.

Трьома крапками в (12) позначені решта об'ємних густин сил (поділених на ρ), що в рамках першого наближення у розв'язанні задачі описання інерційних хвиль мають другорядне значення. Серед них градієнт тиску та електромагнітні пондеромоторні сили. Останні, як буде показано нижче, взагалі зануляються. На відміну від (13), в (12) відсутній член з другою в'язкістю, що еквівалентно обмеженню:

$$\vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}\vec{\upsilon}\right) = 0, \tag{14}$$

подібному до (10). Натомість рівняння (12) містить в правій частині член з другою похідною швидкості за часом, де через υ_{ph} позначено фазову швидкість хвилі накачки – дисипації. Через ν_{co} в (12) позначено деяку кооперативну в'язкість, що характеризує всю динамічну систему в цілому та описує одночасно як дисипацію енергії окремої моди руху, так і енергетичну накачку в цю моду. Цю хвильову форму руху представимо у вигляді:

$$\vec{\upsilon}(t, \vec{r}) = \vec{\upsilon}_a \cdot e^{i\left(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}\right)}. \tag{15}$$

Тут $\vec{\upsilon}_a$ – комплексна амплітуда хвилі швидкості, ω, $\vec{k}$ – циклічна частота та хвильовий вектор (взагалі кажучи, комплексні), t – час, $\vec{r}$ – радіус-вектор, i – уявна одиниця.

У першому наближенні параметри ω, $\vec{k}$ вважаються сталими, однак при більш точному топологічному аналізі слід вести мову про поле хвильових векторів $\vec{k}$, що відповідають полю швидкості $\vec{\upsilon}$. Однак, у всіх наближеннях циклічна частота ω залежить лише від часу, а поле хвильових векторів $\vec{k}$ – лише від координат:

$$\omega = \omega(t),\ \vec{k} = \vec{k}(x, y, z). \tag{16}$$

Підставляючи (15) в (12) у першому наближенні отримаємо:

$$i\left(\omega - \vec{k}\cdot\vec{\upsilon}\right)\vec{\upsilon} = \ldots - \nu_{co}\cdot\left(k^2 - \frac{\omega^2}{\upsilon^2{}_{ph}}\right)\vec{\upsilon}. \tag{17}$$

Рівняння (17) задовольняється за умов:

$$\omega = \vec{k}\cdot\vec{\upsilon} = k\cdot\upsilon\cdot\cos\alpha,\ k^2 = \omega^2/\upsilon_{ph}{}^2, \tag{18, 19}$$

де α – кут між векторами $\vec{k}$ і $\vec{\upsilon}$. Умова (18) встановлює неявно закон дисперсії внутрішніх інерційних хвиль, з якого визначаються їх групова швидкість $\overrightarrow{\upsilon_{gr}}$ (явно) та фазова швидкість υ_{ph} (неявно):

$$\overrightarrow{\upsilon_{gr}} = \frac{\partial\omega}{\partial\vec{k}} = \vec{\upsilon},\quad \upsilon_{ph} = \omega/k = \upsilon\cdot\cos\alpha. \tag{20, 21}$$

Як видно, групова швидкість хвиль співпадає з $\vec{\upsilon}$, а тому рівняння (12) описує хвильове (а не конвективне) поле швидкостей рухомого середовища. Особливістю цих хвиль, як слідує з (21), є те, що їх фазова швидкість за модулем не перевищує групову. За умови (18) (у першому наближенні) фактично збалансовуються інерційні компоненти силового поля в (12), що й виправдовує наведену вище назву таких хвиль. Між тим, вони суттєво відрізняються від відомих інерційних хвиль, збуджених силою Коріоліса у середовищі, що обертається [9]. Зокрема, частоти хвиль, що розглядаються тут, не обмежені зверху – тоді як відомі інерційні хвилі у нестискуваній рідині обмежені по ω подвоєною циклічною частотою обертання середовища [9].

Ліві частини рівнянь (12, 17) можуть бути охарактеризовані одночасно і як інерційні, і як топологічні (розглядається нижче), праві – як енергетичні. З умови необхідного домінування інерційно-топологічних компонент щодо енергетичних (за модулем для кожної) слідують обмеження:

$$\omega > \nu_{co}\cdot k^2,\ \omega > \nu_{co}\cdot\frac{\omega^2}{\upsilon_{ph}{}^2} \tag{22, 23}$$

або ж

$$\nu_{co}\cdot k^2 < \omega < \frac{\upsilon^2{}_{ph}}{\nu_{co}}. \tag{24}$$

Умови (22–24) задовільняються одночасно, якщо прийняти

$$\omega = N_{ch}\cdot\nu_{co}\cdot k^2 = \frac{\upsilon_{ph}{}^2}{N_{ch}\cdot\nu_{co}}, \tag{25}$$

де N_{ch} – параметр когерентності, що задає число коливань до збою фази і може бути безпосередньо визначений з часових періодограм, або ж із Фур'є-спектрів відповідних динамічних процесів.

Таким чином, закон дисперсії встановлюється вже у першому наближенні, застосовність якого (як легко перевірити підстановкою (15) в (12)) визначається умовами:

$$\left|t\cdot\frac{\partial\omega}{\partial t}\right| < |\omega|,\ \left|\vec{r}\cdot\left(\left(\vec{\upsilon}\cdot\vec{\nabla}\right)\vec{k}\right)\right| < \left|\vec{k}\cdot\vec{\upsilon}\right| \tag{26, 27}$$

Ці умови, як видно, вимагають локальності хвильового процесу як у часовому, так і у просторовому вимірах.

Співвідношення (25) включають як базову величину згадуваний вже параметр кооперативної в'язкості ν_{co}, що за розмірністю (см^2/с) співпадає з потоком завихореності через переріз локалізованої трубки поля завихореності $\vec{\Omega} = rot\vec{\upsilon}$, який зберігається в процесі релаксації при топологічному тлумаченні когерентних структур руху в космічних системах [1].

Перетворивши ліву частину (12) за відомою формулою Лемба – Громеко [9], отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial\vec{\upsilon}}{\partial t} + \vec{\nabla}\left(\upsilon^2/2\right) - \left[\vec{\upsilon}\times rot\vec{\upsilon}\right] = \ldots + \nu_{co}\cdot\left(\Delta\vec{\upsilon} - \frac{1}{\upsilon_{ph}{}^2}\frac{\partial^2\vec{\upsilon}}{\partial t^2}\right), \tag{28}$$

яке у структурному відношенні цілком аналогічне рівнянню (8) для потенціалів електромагнітного поля, що підкреслює відмічену раніше [1] топологічну аналогію між $\vec{\upsilon}$ та $\vec{A}$. Занулення у першому наближенні лівих частин (12, 28) за умови (18) з врахуванням такої аналогії та співвідношень (1, 2, 7) фактично зануляє струм провідності у середовищі, а також відповідно пондеромоторну силу Лоренца. Це, як уже відмічалось, виправдовує нехтування цією силою в (12, 17).

Взявши ротор від обох частин (28), матимемо:

$$\frac{\partial\vec{\Omega}}{\partial t}-rot\left[\vec{\upsilon}\times\vec{\Omega}\right]=...+\nu_{co}\cdot\left(\Delta\vec{\Omega}-\frac{1}{\upsilon_{ph}^{2}}\frac{\partial^{2}\vec{\Omega}}{\partial t^{2}}\right). \quad (29)$$

Це рівняння цілком аналогічне рівнянню (11) для індукції магнітного поля в рухомому середовищі, що відображає топологічну аналогію полів $\vec{\Omega}$ та $\vec{B}$ [1].

Як слідує з (15), у першому наближенні розв'язання задачі

$$\vec{\nabla}\vec{\upsilon}=-i\vec{k}\cdot\vec{\upsilon}=-i\omega\,,\ \vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}\vec{\upsilon}\right)=-i\vec{\nabla}\omega=0\,, \quad (30, 31)$$

що задовольняє умову (14). З (30) слідує, що при ненульових частотах дивергенція швидкості не дорівнює нулю, що свідчить про стискуваність середовища. Це додатково відрізняє дані інерційні хвилі від згадуваних вже інерційних хвиль, збуджених силою Коріоліса у нестискуваній рідині [9].

Топологічна аналогія між $\vec{\upsilon}$ та $\vec{A}$ в даному контексті свідчить про те, що дивергенція $\vec{A}$ у когерентних (щодо внутрішніх) електромагнітних хвилях також не рівна нулю. Це якісно відрізняє останні від електромагнітних хвиль у вакуумі, описання яких стандартно включає умову $\vec{\nabla}\vec{A}=0$ [7, 8].

З (12, 15, 17, 30) слідує, що в лаконічній формі застосування першого наближення при описанні інерційних хвиль виражається умовою:

$$\left(\vec{\upsilon}\cdot\vec{\nabla}\right)\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}\cdot\left(\vec{\nabla}\cdot\vec{\upsilon}\right). \quad (32)$$

Взявши ротор (15), у тому же наближенні отримаємо:

$$\vec{\Omega}=rot\vec{\upsilon}=-i\left[\vec{k}\times\vec{\upsilon}\right], \quad (33)$$

що говорить про ортогональність векторів $\vec{\upsilon}$ та $\vec{\Omega}$, яка автоматично зануляє гідродинамічну спіральність *h:*

$$h=\vec{\upsilon}\cdot rot\vec{\upsilon}=\vec{\upsilon}\cdot\vec{\Omega}\,. \quad (34)$$

Оскільки зазвичай саме спіральність формує топологію когерентних структур руху [1], то при аналізі такої топології слід вийти за рамки першого наближення. Космічні системи у цьому відношенні доступні, принаймні, візуально.

Зауважимо, що незважаючи на збалансованість (у першому наближенні) інерційних компонент в (12, 17), наявність компонент правої частини цих рівнянь порушує умови відомої теореми Томсона (Кельвіна) щодо збереження циркуляції швидкості [9]. Це фактично «розморожує» гідродинамічне поле завихореності та відповідне магнітне поле, формуючи когерентні хвильові структури руху вже не в речовині, а у просторі. Такий підхід повністю суперечить МГД, де панує конвекція, «приправлена» диференційним обертанням та силою Коріоліса [2–6]. У всіх попередніх частинах даної роботи наводились експериментальні результати, що підтверджують можливість поширення внутрішніх інерційних хвиль не тільки в рідині, чи газі, але й в твердому тілі, де конвекція відсутня як така.

Зауважимо також, що фазова швидкість υ_{ph}, що входить у вище наведені співвідношення, а також відповідна їй швидкість $c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ електромагнітних хвиль у речовині, можуть мати, взагалі кажучи, комплексні значення (у т.ч. суто уявні). Це відображається на формі часової розгортки відповідного сигналу – синусоподібної (у випадку переважно дійсної фазової швидкості), або ж автомодуляційної (у випадку переважно уявної). Емісійні спектри інерційних хвиль в технічних, гідродинамічних та космічних системах зазвичай поділяються на низькочастотні (довгохвильові) та високочастотні (короткохвильові) кластери, розділені «спектральними долинами» [29] – рис. 1. Низькочастотні кластери пов'язані, передусім, з перенесенням моменту імпульсу – переважно в напрямі великих часових та просторових масштабів. Такого роду кооперативне перенесення моменту в ансамблі інерційних хвиль пояснює, зокрема, некеплерівський розподіл швидкостей в астрофізичних дисках, що в рамках існуючих уявлень [38], ніби-то свідчить на користь прихованої маси та темної енергії. Виходячи лише з кеплерових форм руху речовини в астрофізичних дисках, автори роботи [39] апелюють до транзієнтних (немодальних) механізмів перенесення моменту імпульсу на периферію системи. Однак, кеплерові форми далеко не вичерпують можливостей внутрішнього синтезу руху в космічних системах за участю контактно-наведених інерційних хвиль.

До прикладу, на рис. 1 показані дисипаційні спектри в технічних, гідродинамічних та космічних системах, що відображають розділення внутрішніх інерційних хвиль на високочастотний (короткохвильовий) та низькочастотний (довгохвильовий) кластери, відповідно з переважно дійсною та з переважно уявною фазовою швидкістю хвиль. Щодо інерційних хвиль, наведених контактною взаємодією приливів з берегом (рис. 1в), то вони, як і відповідні хвилі в космічних системах, частково «маскуються» відміченими вже Коріолісовими інерційними хвилями, спонукаючи, зокрема, авторів робіт [10, 11] до висновків про «аномальну мінливість інерційних хвиль».

Високочастотні кластери спектрів, показаних на рис. 1, відповідають кооперативному перенесенню, власне, імпульсу, а не його моменту. В гідродинамічних системах це виражається в цугах солітоноподібних внутрішніх хвиль, що характеризуються підвищеною когерентністю [10–12]. Крім відмічених двох кластерів у спектрах контактно-наведених інерційних хвиль проявлені також і гібридні моди – з порівняними значеннями перенесення імпульсу та його моменту. В технічному спектрі рис. 1б це виявилось у вигляді виділеної лінії на роторній частоті (≈200 Гц) посеред відміченої «спектральної долини» між двома кластерами.

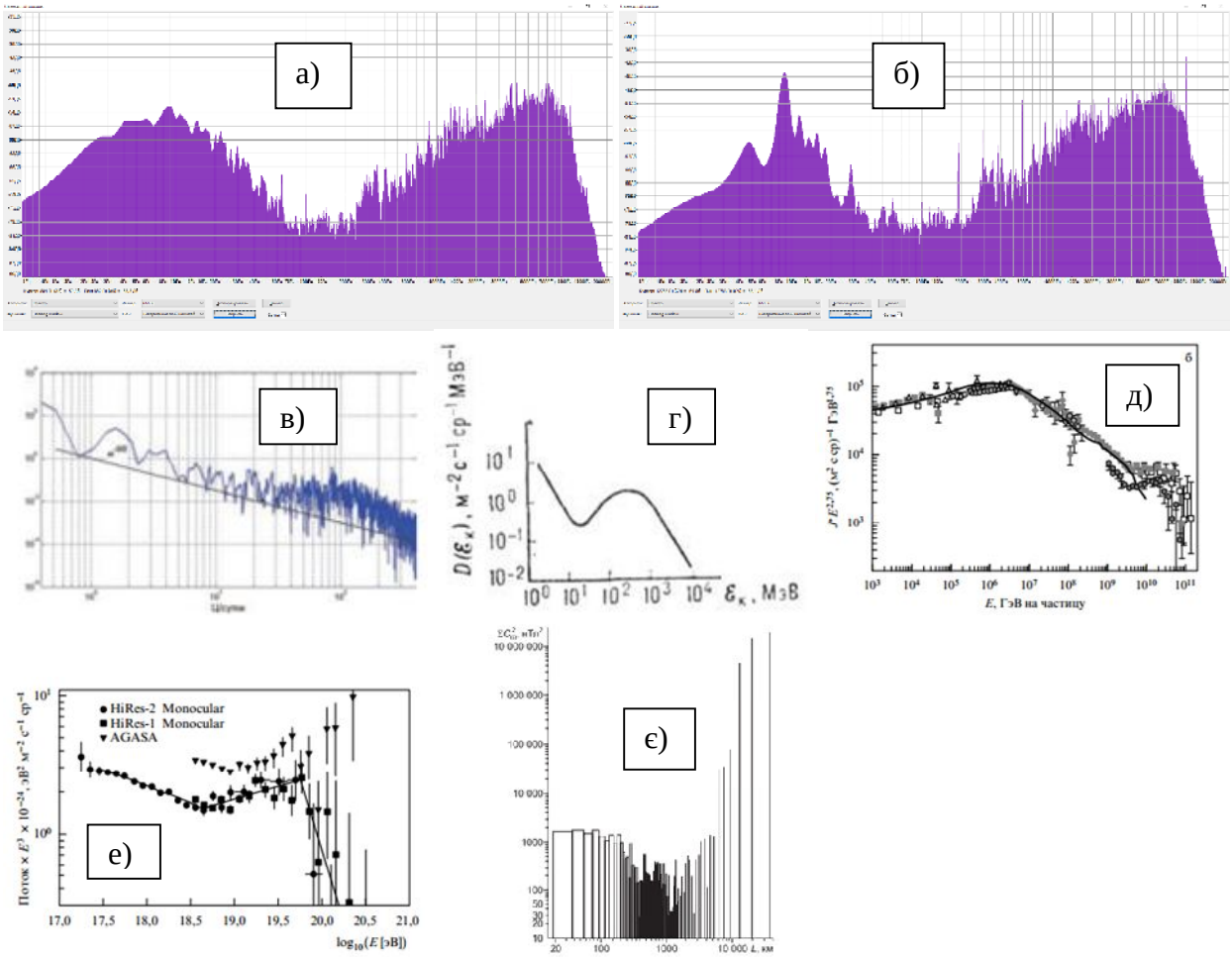


Рис. 1. Спектри акустичної емісії електромеханічної плоскошліфувальної машини в режимі холостого ходу при двох різних просторових положеннях корпусу (а, б); спектри внутрішніх хвиль, зареєстровані в прибережній зоні Японського моря (в) [12]; спектри космічних променів середніх (г) [5] та надвисоких енергій (д, е) [24, 25]; спектр просторових варіацій геомагнітного поля (є) [36]

Перевантажена нестандартними математичними образами, фрактальна топологія та дивна кінетика [37] в питаннях космічної спектродинаміки застосовує всі ті ж підходи, що й класична МГД: ігнорування струму зміщення, уявлення про вмороженість магнітного поля в плазму, переоцінку ролі нехвильових процесів переносу (дифузії та конвекції). Це відображено у коментарях [37] щодо особливостей у спектрах, наведених на рис. 1г,д.

Відносно велика спектральна ширина низькочастотних компонент спектрів, показаних на рис. 1, свідчить про те, що параметр N_{ch} для них близький до одиниці. З вище наведених співвідношень, між тим, слідує, що N_{ch} близький до відомого числа Рейнольдса: гідродинамічного (Re) та магнітного (Re_m). Отже, для низькочастотних хвиль в рамках даного розгляду $Re \sim Re_m \geq 1$, що суттєво відрізняється від постулатів МГД щодо «космічних» значень чисел Рейнольдса в космічних системах на рівні 10^6-10^{10} [2–6].

Кооперативна в'язкість та лінійна трансформація інерційних хвиль на контактних поверхнях

Форма правої частини (12) відображає, принаймні, дві характерні особливості динамічних систем, що розглядаються тут: 1) колективна взаємодія збурень є настільки сильною, що практично повністю визначає динаміку системи, 2) накачка та дисипація енергії в окрему моду збурень тісно взаємопов'язані (через параметр ν_{co}) – за принципом «що віддав – те твоє». Останнє, очевидно, є ознакою динамічної самоорганізації в системі.

Взаємна трансформація мод і перенесення енергії та енстрофії за спектром збурень здійснюються переважно в процесах їх взаємодії на контактних поверхнях. Лінійність трансформації, що зберігає модовий характер збурень, підтверджується, зокрема, осцилограмами сигналів акустичної емісії в технічних системах. Приміром, на рис. 2 показані осцилограми трансформації акустичних хвиль (на основі яких в даному випадку формуються внутрішні хвилі) на поверхні дзеркала в результаті двох послідовних ударів кульки підшипника. Як видно, зберігаються практично всі характерні (і вельми заплутані) особливості сигналів. Спостерігається лише зменшення амплітуди по мірі згасання енергії ударника. Подібна ідентичність «акустичного підпису» спостерігалась також при ударах по інших поверхнях – зі зміною енергії ударника в межах, принаймні, трьох порядків величини, що прямо підтверджує лінійність процесів поверхневої трансформації хвиль.

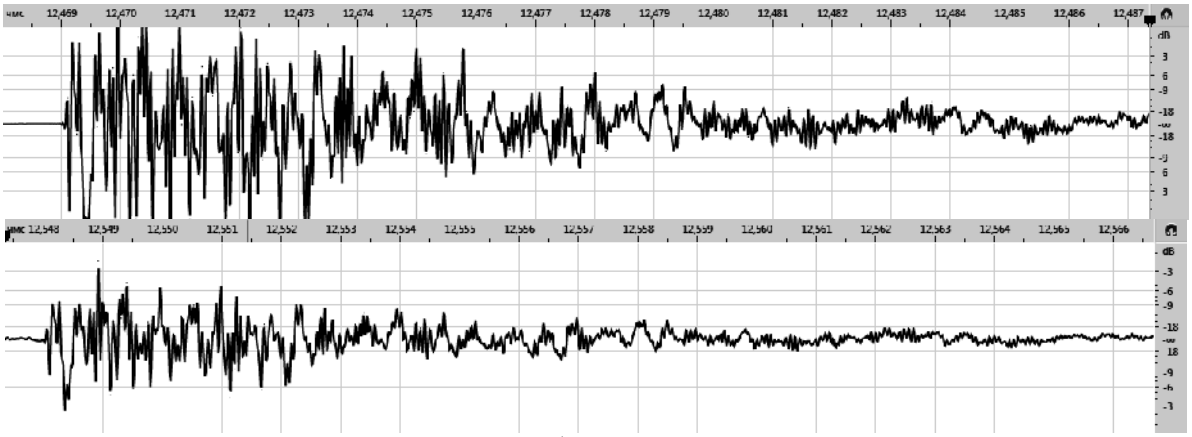


Рис. 2. Акустограми коливань скляного дзеркала, збуджених двома послідовними ударами кульки підшипника

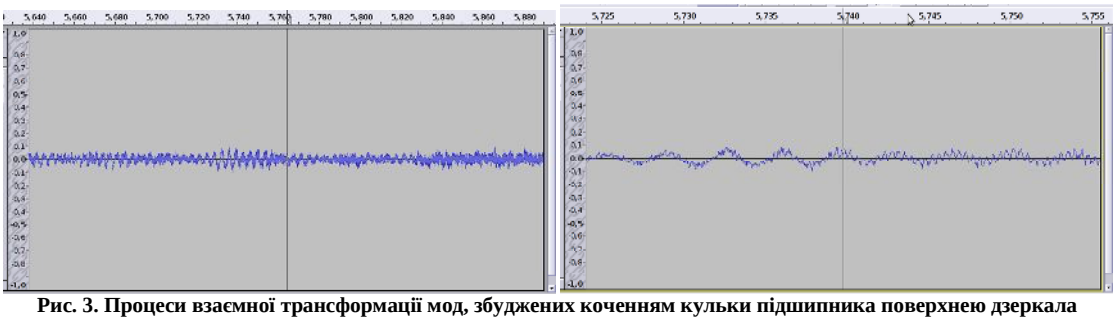


Рис. 3. Процеси взаємної трансформації мод, збуджених коченням кульки підшипника поверхнею дзеркала

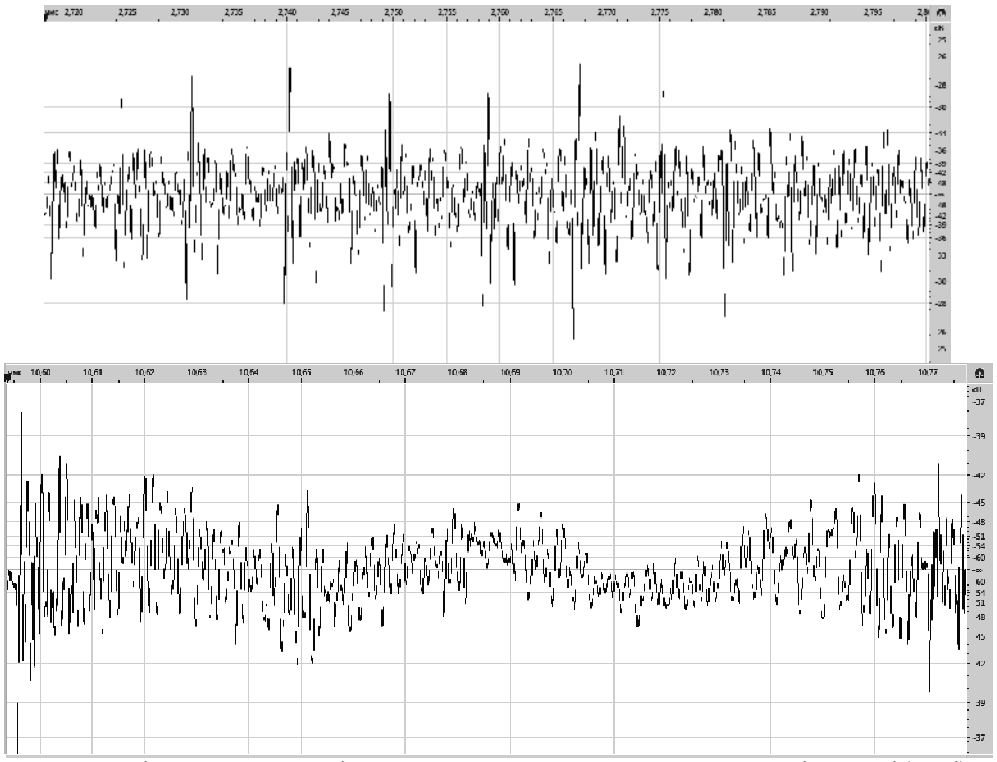


Рис. 4. Акустограми процесів кочення кульки підшипника поверхнею гетинаксового стола за відсутності (вгорі) та за наявності (внизу) демпфуючої прокладки з листків паперу

Приклад взаємодії трансформації двох мод (низькочастотної та високочастотної), збуджених коченням кульки підшипника поверхнею того ж дзеркала, показаний на рис. 3. Частотний спектр подібних процесів контактної взаємодії суттєво залежить від демпфуючих характеристик поверхні контакту. На рис. 4 наведені осцилограми акустичної емісії процесів кочення кульки підшипника поверхнею гетинаксового стола за відсутності (а) та за наявності (б) демпфуючої прокладки з листків паперу товщиною 0,1 мм. Як видно з осцилограм, а також з відповідних Фур'є-спектрів прийнятого акустичного сигналу, введення демпфера суттєво подавляє високочастотний кластер сигналу, практично не змінюючи загальний вид низькочастотного. Це свідчить про рівноправність останнього щодо свого незалежного походження – як окремої власної форми руху неперервного спектру. Такого роду моди суттєво розширюють спектр власних

мод обмеженого (локалізованого) середовища, який зазвичай зводять лише до відомих мод дискретного спектру.

В даному контексті зауважимо, що прийнятий в гідродинаміці підхід щодо розмежування акустичних та вихрових мод шляхом переходу до нестискуваного середовища (з відповідним зануленням дивергенції поля швидкості) [9] є неадекватним, оскільки, по суті, залишає поза увагою важливий клас внутрішніх інерційних хвиль у стискуваному середовищі, що розглядаються тут.

Відмітимо також важливу роль просторового та часового самообмеження в кооперативній динаміці систем. Без автолокалізації (незважаючи на можливість експансії в часі та просторі) та створення власних границь (у т.ч. контактних) кооперативна система не здатна самоорганізуватись, оскільки така самоорганізація ґрунтується на замиканні зворотних зв'язків, що неможливо в нелокальній системі. Формально це означає обмеженість просторових і часових спектрів збурень як згори, так і знизу.

Як не дивно, нарощування зворотних зв'язків врешті не тільки не заплутує, а навпаки, різко спрощує динамічне описання систем рівняннями виду (12), де фігурує єдиний «конституціональний» параметр ν_{co}. В плазмі та металах, як показує дослід [1], утворення когерентних пакетів інерційних та електромагнітних хвиль можливе за умови близькості параметрів кооперативної та магнітної в'язкості:

$$\nu_m \approx \nu_{co} . \tag{35}$$

Між тим, інерційні та електромагнітні хвилі в таких пакетах не ідентичні за параметром когерентності N_{ch}, що пояснюється, зокрема, впливом мод дискретного спектру на інерційні моди неперервного спектру. Цей вплив виражається у частковій синхронізації мод, порушення (відновлення) якої обумовлює внутрішню динаміку пакетів.

Періоди $T = 2\pi / \omega$, довжини хвиль $\lambda = 2\pi / k$ та модуль групової швидкості хвиль (і кут α) у таких пакетах пов'язані згідно (25) наступним чином:

$$\frac{\lambda^2}{T} = 2\pi N_{ch} \cdot \nu_{co} , \quad \frac{2\pi}{T} = \frac{\upsilon^2 \cdot \cos^2 \alpha}{N_{ch} \cdot \nu_{co}} . \tag{36, 37}$$

Нижче будуть наведені результати аналізу такого роду «динамічних кооперативів» в космічних системах різного масштабу.

«Динамічний кооператив» в системі Земля – Місяць

Параметр υ_{co} для цієї системи не важко визначити з енциклопедичних джерел [5] щодо часових та просторових масштабів вікових варіацій геомагнітного поля в межах відповідно 60–7000 років та 600–6000 км, що дає:

$$\nu_{co} \approx (2,5 - 3,5) \cdot 10^5 \ \text{см}^2/\text{с} \tag{38}$$

Така кооперативна в'язкість згідно з (9, 35) відповідає ефективній провідності надр Землі

$$\sigma \approx (2-3) \cdot 10^{14} \text{с}^{-1} \approx (2-3) \cdot 10^4 \text{См/м} \tag{39}$$

Остання в цілому відповідає провідності підконтактних (з рідким ядром) зон мантії, а також (з врахуванням високої температури) – провідності рідкого та твердого ядер Землі.

Найцікавішим (для нас) результатом аналізу даного «динамічного кооперативу» стало визначення просторового масштабу λ, що відповідає найбільшому часовому періоду T≈700-800 мільйонів років глобального руху континентів та плюм-тектонічної активності в історії Землі [13]. Як слідує з (36, 38), цей період добре узгоджується зі значенням $\lambda \approx 2\pi R_{З\text{-}М}$, де $R_{З\text{-}М} \approx 384$ тис. км [5] – середня відстань від Землі до Місяця. З цього слідує, що глобальний рух континентів на нашій планеті та глибинні геодинамічні процеси в тілі Землі визначаються інтерференцією інерційних хвиль в кооперативній динамічній системі Земля – Місяць з параметром ν_{co} згідно з (38). Це відкидає конвективний сценарій глобальної геодинаміки, розтиражований академічними інститутами [13], так само, як і аналогічний сценарій генерації геомагнітного поля конвективними рухами речовини рідкого ядра Землі [2–6].

«Динамічний кооператив» Сонця

Основні періоди варіацій сонячної активності (≈11 років та ≈100 років), а також просторово-часові параметри локалізованих когерентних структур руху в конвективній зоні та атмосфері Сонця (комірок грануляції, надгрануляції, гігантських комірок, сонячних плям, спікул, філаментів, протуберанців та ін.) взаємно узгоджені з параметром

$$\nu_{co} \approx (5-10) \cdot 10^{12} \text{ см}^2/\text{с} \tag{40}$$

При цьому підвищена когерентність основного періоду варіацій сонячної активності ($N_{ch} \sim 10$) обумовлена частковою синхронізацією з періодом обертання Юпітера ($T_{ю}$=11,86 років). Інерційно-хвильовий характер т.з. «торсійних коливань» на поверхні Сонця в ході основного циклу активності, що відмічений лише в окремих роботах [14], як і хвильовий характер надгрануляції [15], стандартно заперечується в основній масі публікацій, що декларують суто конвективний механізм динамічних процесів у однойменній зоні Сонця [5, 16–18]. У цьому контексті зауважимо, що сама назва «конвективна зона» Сонця є неадекватною, оскільки хибно відносить на рахунок конвекції динамічні процеси суто хвильового характеру. Це пояснює, зокрема, можливість реєстрації на поверхні Сонця не тільки відомих т.з. «п'ятихвилинних» коливань всього диску, що мають переважно акустичний характер [5, 19, 20], але й

значно триваліших 1–3-годинних коливань, що відповідають гравітаційним хвилям [19–21] – рис. 5. Останні в стандартній інтерпретації аж ніяк не змогли б подолати вельми широку конвективно-нестійку зону на поверхні Сонця. Контактна генерація внутрішніх інерційних хвиль, синхронізованих (частково) з гравітаційними модами Сонця, дозволяє подолати цей бар'єр. Накладання та взаємна трансформація інерційних мод суцільного спектру та акустично-гравітаційних мод дискретного спектру пояснює також існуючі розбіжності з фактом в теоретичних розрахунках останніх [5].

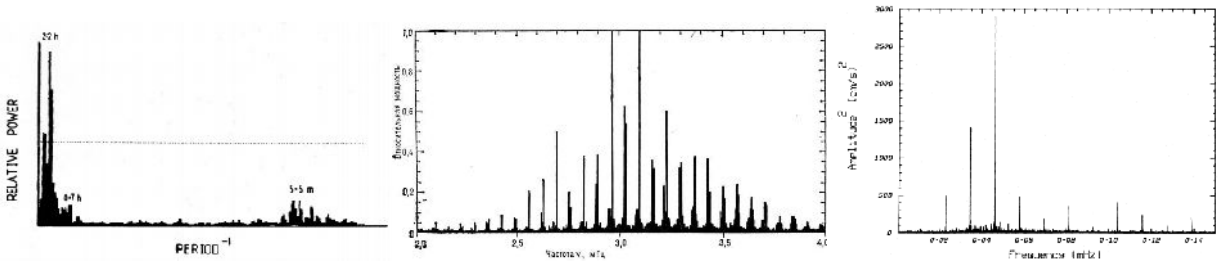


Рис. 5. Загальний вид спектру коливань диску Сонця (а) [19] та детальні спектри «пятихвиллиних» (б) [5] та 1–3-годинних коливань (в) [21]

Топологічно-складні локалізовані структури руху, що спостерігаються на поверхні Сонця, потребують конкретизації кута α в (18, 21, 37),а також просторової орієнтації векторів $\vec{\upsilon}$ та $\vec{k}$ у хвилях. Як показує, зокрема, аналіз динаміки спікул, для них кут α між $\vec{\upsilon}$ і $\vec{k}$ становить 80°–85°. При цьому спікули т.з. I–II роду [22] відрізняються орієнтацією хвильового вектора $\vec{k}$: радіальною (для спікул II роду), або ж тангенційною (для спікул I роду). Ця суто топологічна різниця вельми далека від наведених в роботі [22] різноманітних механізмів генерації спікул, що розглядаються у вузьких рамках МГД.

Взаємна трансформація мод в «динамічному кооперативі» Сонця, яка супроводжується дисипацією енергії, пояснює «аномально високу» температуру Сонячної корони. Щодо процесів у геліосфері поза внутрішньою короною Сонця, то вони відображають, безумовно, перехід до цілком іншої кооперативної динамічної системи. При періоді існування в декілька місяців найхарактернішої когерентної структури руху в цій системі (т.з. спіралі Паркера [5]), визначаючи параметр λ периметром геліосфери, з (36) отримуємо оцінку

$$\nu_{co} \sim 10^{24} \text{ см}^2/\text{с}, \tag{41}$$

що виходить далеко за межі (40) розглянутого вище «маленького Сонячного кооперативу».

Короткохвильова границя спектру космічних променів надвисоких енергій та рух з надсвітловими швидкостями

Прихильники відомого ГЗК-обрізання (Грейзена – Зацепіна – Кузьміна) енергетичного спектру космічних променів [23] вперто відстоюють існування короткохвильової границі спектру на рівні lg(E(eB))≈20,5, незважаючи на дані детектора AGASA (рис.1 е) та намагаються спростувати ці дані [23] без усвідомлення контактних механізмів генерації самих космічних променів надвисоких енергій [26].

Як уже відзначалось, характерною особливістю внутрішніх інерційних хвиль є відсутність обмежень на значення групової швидкості. Одночасно, виходячи лише з рівнянь Максвелла, не слід обмежувати фазову швидкість електромагнітних хвиль у провідному середовищі. Принаймні формально $\upsilon_{ph} = c/\sqrt{\varepsilon\mu} \gg c$ при $\sqrt{\varepsilon\mu} \ll 1$ (в даному випадку при рівнорозподілі електричної та магнітної енергії у хвилях домінуватиме вже не магнітна, як при $\upsilon_{ph} \ll c$ [1], а електрична компонента поля – за умови $\mu \sim 1$).

Із врахуванням (9, 35, 37) отримаємо оцінку верхньої границі частотного спектру пакетів інерційних та електромагнітних хвиль залежно від електропровідності середовища:

$$f = T^{-1} \le \frac{\upsilon^2}{c^2} \cdot 2\mu\sigma \tag{42}$$

Енергіям космічних частинок на межі ГЗК-обрізання відповідають частоти $f \sim 10^{35}$ Гц, що при обмеженні $\upsilon \le c$ згідно з (42) приводить до нереальних («космічних») значень σ на тому ж рівні, що й f. Значно логічніше однак взяти ці обмеження, допустивши наступне:

$$\upsilon^2 / c^2 \gg 1, \tag{43}$$

що автоматично понижає електропровідність генеруючих галактичних ядер до прийнятних значень. Таке допущення ставить під сумнів вже не лише загальну теорію відносності Ейнштейна [1, 26], але й спеціальну теорію відносності, яка успішно зарекомендувала себе в рамках земних умов та технологій. Добре усвідомлюючи той факт, що форма гідродинамічного рівняння Ейлера, яке лежить в основі (12), далека від релятивізму, і спираючись лише на топологічну спорідненість полів $\vec{\upsilon}$ та $\vec{A}$, залишимо, однак, допущення (43) в силі. Протилежне, вочевидь, легко доведуть теоретики релятивізму, що звели свої побудови на основі механіки матеріальної точки Лагранжа, а не концепції поля Ейлера – Фарадея.

Отже, наявна різниця в спектрах космічних променів, зареєстрованих різними детекторами (рис. 1е)

пояснюється різницею в параметрах ν_{co} (і відповідно – ν_m) для галактичних ядер, що є джерелами цих променів на різних ділянках неба. При цьому самі ядра, вочевидь, знаходяться від нас на відстанях , які не перевищують радіус т.з. ГЗК-сфери [23], що й пояснює відсутність «жаданої» границі спектру космічних променів, зокрема, в даних детектора AGASA.

Катастрофічні режими в динаміці технічних (енергетичних) та космічних систем

Природа, вочевидь, не любить катастроф. Це, зокрема, виражається у вкрай рідкісних спалахах нових та наднових зір [27]. Однак, допускає катастрофи. Власне, як і наша технократична цивілізація, одне існування якої вже слід вважати катастрофою.

Відмітимо також поширеність «мікрокатастроф» у космічних системах, наприклад, сонячних спалахів, що супроводжуються гігантськими виверженнями плазми й електромагнітного поля в геліосферу. Ці «мікрокатастрофи», однак, можуть бути представлені лише особливим видом контактно-обумовленого витікання речовини і поля за межі системи, вже врахованим у параметрі ν_{co}. Тому нижче мова йтиме про «справжні» макрокатастрофи, які знищують систему в цілому. Таке знищення, однак, веде до створення цілком нової дочірньої системи, причому у максимально стислі строки. Наприклад, на рис. 6а наведений знімок чудового космічного «намиста», що виникло на місці спалаху наднової зорі SN1987A за якихось півтора десятка років після вибуху [27]. Для порівняння на рис. 6б наведений знімок звичайної спіральної галактики, еволюційний синтез якої зайняв мільярди років.

Рис. 6. Космічні системи, синтезовані катастрофічним (а) [27] та еволюційним (б) шляхами

Флаттер (динамічне тріпотіння) як несумісне з цілісністю системи накопичення енергії в одній моді руху, що «відірвалась від колективу», в цілому нетиповий для космічних систем в зв'язку з наявністю щільного ряду конкуруючих власних частот і форм дискретного спектру для небесних тіл. Щодо Сонця це було доведено ще в процесі тривалої полеміки навколо виділеності т.з. 160-хвилинних коливань Сонця [5, 20, 28], які врешті виявились артефактом, пов'язаним з дев'ятою гармонікою обертання Землі [21]. Однак, тут, як і в технічних системах, можливий колективний флаттер за участю контактно-наведених інерційних хвиль, що розглядались вище. В такому випадку енергія збурень надмірно накопичується одразу у всій системі, що веде до її динамічного самознищення. З врахуванням оберненого енергетичного каскаду контактно-наведених внутрішніх хвиль [1, 26] максимальне накопичення енергії характерне саме для найбільших просторових та часових масштабів, що й пояснює знищення системи в цілому. Основний механізм енергопостачання тут внутрішній - за рахунок термоядерного синтезу та переходів ущільненої метастабільної речовини ядер систем у більш рівноважний стан [1, 26, 29].

Ще у першій частині даної роботи [29] було відмічено співпадання генеруючого контактного розриву в сонячному ядрі з основною зоною термоядерного синтезу. У вельми рідкісних випадках вибухів нових та наднових зір подібне співпадіння створює прийнятні умови для ефективної енергетичної автомодуляції системи шляхом узгодженої з коливаннями оболонки зміни тиску в області термоядерного синтезу. Така автомодуляція в критичних випадках спричиняє як мінімум скидання оболонки, як максимум – крах системи. Подібний механізм дозволяє обійтись без штучних теоретичних конструкцій з колапсом ядра, жодна з яких не здатна змоделювати скидання оболонки [5, 27]. Внутрішня суперечливість цих конструкцій полягає у тому, що гіпотетичний колапс ядра вважається закономірним фіналом еволюції зір з масою, що перевищує вісім мас Сонця, в той час, як самі вибухи нових та наднових зір є вкрай рідкісними подіями [27].

Крім того, у випадку наднової SN1987A спостерігались не один, а два нейтринних спалахи, розділені часовим інтервалом майже в п'ять годин. Це аж ніяк не вписується в стандартну модель колапсу [5] та змушує розвивати альтернативні моделі декількох послідовних колапсів у сильно деформованій системі, що обертається [27]. Подібні моделі, як і початкова, виглядають вельми штучними та суперечливими.

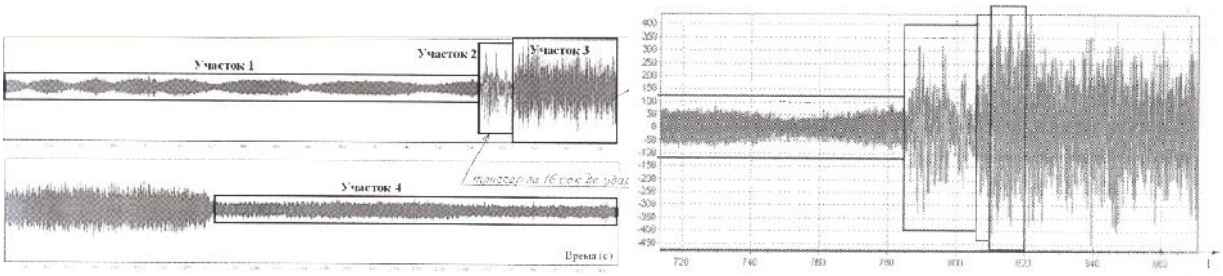


Рис. 7. Загальна сейсмограма (а) [32] та деталізація сейсмограми (б) [33] Саяно-Шушенської катастрофи

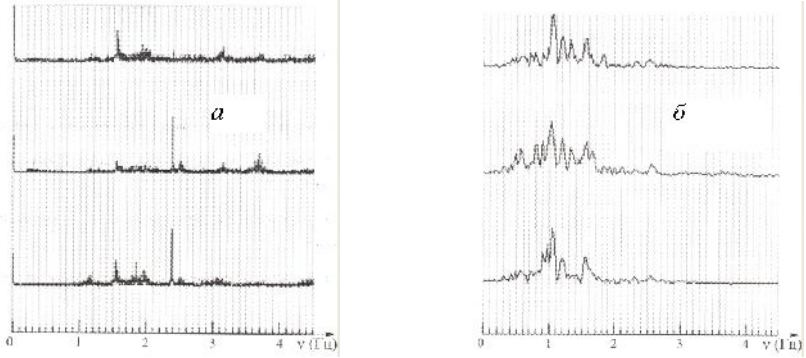


Рис. 8. Фур'є-спектри сейсмограм, показаних на рис. 7, у високочастотній області: (а) – до виведення ГА-2 з робочої зони, (б) – в процесі виведення до порушення цілісності кріплень кришки турбіни [33]

В якості технічного аналога коротко розберемо тут механізм відомої гідроенергетичної катастрофи на Саяно-Шушенській ГЕС, офіційно зведений до шпильок [30]. Незатягнуті шпильки кришки турбіни другого гідроагрегату (ГА-2) СШГЕС, безумовно, зіграли свою фатальну роль у цій (найбільшій за всю історію гідроенергетики) катастрофі. Роль найслабшої ланки. Однак, були й інші (невстановлені досі) чинники, що розглядаються нижче.

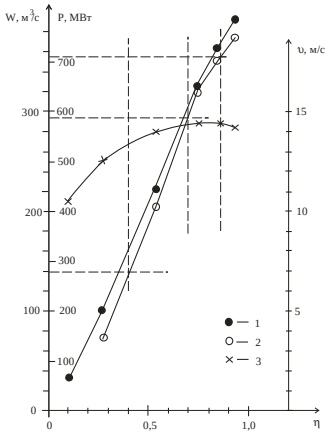


Рис. 9. Розрахунки залежностей витрати води у водоводі (1), електричної потужності генератора (2) і швидкості потоку поблизу лопаток направляючого апарату (3), зроблені на основі експериментальних даних роботи [31]

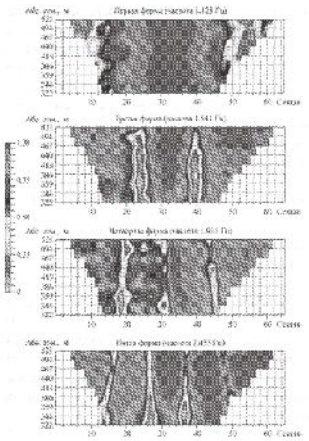


Рис. 10. Карти спектрів когерентності радіальних коливань плотини СШГЕС на фіксованих частотах власних форм [34]

З сейсмограм катастрофи (рис. 7) чітко видно якісну зміну сейсмічного пакету збурень, що генеруються роботою гідроагрегатів в уміщальному геологічному середовищі, в момент виведення ГА-2 з робочої (третьої) в аварійно-небезпечну другу зону в процесі планового зниження потужності гідроагрегата. В значно підсиленому пакеті інерційних хвиль домінують моди з періодами ≈1 с, ≈6-7 с та ≈20 с, які забезпечують типовий каскадний процес [26, 29] перенесення енергії потоку з лопаток направляючого апарату ГА-2 на статор і далі в уміщальне геологічне середовище. В спектрі високочастотних збурень на першому етапі катастрофи (до порушення цілісності кришки турбіни) домінує частота ≈1,08 Гц (рис. 8б), яка за нашими розрахунками (рис. 9), є другою гармонікою частоти обертання потоку біля лопаток направляючого апарату. На подальших етапах катастрофи по мірі наростання швидкості потоку здійснюється перехід на третю, четверту та частково п'яту гармоніку початкової частоти, що говорить про еволюцію колективної гідродинамічної структури руху, сформованої на першому етапі. Такого роду структури стали справжнім прокляттям СШГЕС з початку її експлуатації [31]. Вони візуально проявляли себе в т.з. другій та четвертій [31] аварійно-небезпечних зонах через концентрацію завихореності потоку за турбінами у вигляді відомих жгутів спіральної форми [31, 33]. Однак менш відомо (точніше – невідомо зовсім), що аналогічні жгути завихореності неминуче продовжувались у статор, формуючи вкрай

анізотропне поле вібронапружень, під яке врешті попадали й окремі шпильки кришок турбін. Анізотропія пошкоджень в ряду шпильок ГА-2 добре висвітлена в акті [30] на відміну від причин катастрофи.

Наведені вище гармоніки частоти обертання потоку дуже близькі до частот відповідно першої, третьої, четвертої та п’ятої форм радіальних коливань плотини СШГЕС (рис. 10), що позначає частковий флаттер в системі. Однак, значно більшу роль у виникненні катастрофи зіграв флаттер лопаток конструктивно-слабкого направляючого апарату ГА-2, що забезпечив згадувану вже енергетичну автомодуляцію системи. Після формування когерентної гідродинамічної структури руху ці лопатки фактично стали зайвими і були частково зрізані потоком води по мірі наростання енергії збурень [30]. Подальша енергетична накачка катастрофи здійснювалась контактною взаємодією потоку з колонами статора (спіральної камери) ГА-2.

На завершення даного розгляду коротко зупинимось на деяких проблемах керованого термоядерного синтезу (КТС), що мають пряме відношення до теми. Інтерес «катастрофічної цивілізації» до КТС прокинувся, як відомо, одразу після «успішного» випробування першої термоядерної бомби. Відомо також, що подібний інтерес до мирної ядерної енергетики, який проявився одразу після настільки ж «успішного» випробування ядерної бомби (десятиліттям раніше), врешті призвів до Чорнобиля та Фукусіми.

Авторам проектів КТС, які цілковито довіряють МГД, невідомо, однак, про існування згадуваного вже оберненого енергетичного каскаду в пакеті когерентних інерційних та електромагнітних хвиль. Цей каскад, між тим, несучи енергію в бік великих просторових масштабів, очевидно, й призвів до аварійної зупинки термоядерного реактора JET (найбільшого на той час у світі) в ході рекордного сеансу в жовтні 1997 р. – рис. 11. Основна проблема класичного КТС – уникнути контакту плазми зі стінками робочої камери – впирається саме в цей каскад, що спонукає локалізовану плазмову конфігурацію до розширення (експансії) у просторі. Чи вдасться зупинити таку експансію заміною токамаків на стелларатори – велике питання. Принаймні, за рік, що пройшов від церемоніального пуску найбільшого на-сьогодні стелларатора, відповіді ми на нього не отримали.

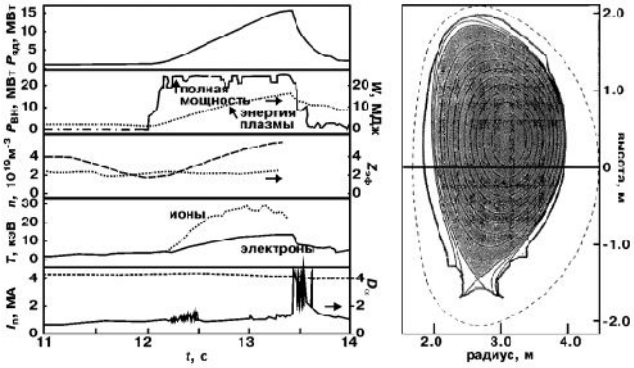


Рис. 11. Часовий хід основних плазмових параметрів в процесі рекордного імпульсу JET (зліва) та розріз магнітних поверхонь JET (справа) [35]. Момент дотику плазми до стінок робочої камери зафіксований різким максимумом сигналу на нижній залежності (зліва)

Стосовно ж альтернативних проектів інерціального термоядерного синтезу в даному контексті зауважимо, що для забезпечення відомого критерію Лоусона тут вкрай важлива ізотропія фронту ударних хвиль, ініційованих взаємодією випромінювання накачки з мішенню. Однак, супутні інерційні хвилі, що неодмінно виникнуть в результаті такої взаємодії, як показують всі попередні дослідження, характеризуються чим завгодно, тільки не просторовою ізотропією.

Література

1. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної та метагалактичної енергії та електромагнетизму. Частина VII / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 212–221.

2. Эльзассер В.М. Магнитная гидродинамика / В.М. Эльзассер // УФН. – 1958. – Т. LXIV, № 3. – С. 529–588.

3. Сыроватский С.И. Магнитная гидродинамика / С.И. Сыроватский // УФН. – 1957. – Т. LXII, № 3. – С. 247–303.

4. Соколов Д.Д. Динамо: на пути от астрофизических моделей к лабораторному експерименту / Д.Д. Соколов, Р.А. Степанов, П.Г. Фрик // УФН. – 2014. – Т. 184, № 3. – С. 313–335.

5. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под. ред. А.М. Прохорова. – М. : Большая росс. энц., 1999. – 760 с.

6. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М. : Наука, 1982. – 660 с.

7. Ландау Л.Д. Теория поля / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М. : Наука, 1988. – 512 с.

8. Савельев И.В. Основы теоретической физики / Савельев И.В. – М. : Наука, 1991. – 496 с.

9. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М. : Наука, 1986. – 736 с.

10. 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 отмосферы и океана. – 2010. – Т. 46, № 5. – С. 694–702.

11. Бондур В.Г. Аномальная изменчивость инерционных колебаний океанских вод на Гавайском шельфе / В.Г. Бондур, К.Д. Сабинин, Ю.В. Гребенюк // ДАН. – 2013. – Т. 450, № 1. – С. 100–104.

12. Ярощук И.О. Экспериментальные исследования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря / И.О. Ярощук, А.П. Леонтьев, А.В. Кошелева // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 1 (15). – С. 37–44.

13. Кузьмин М. Глубинная геодинамика – основной механизм развития Земли / М. Кузьмин, В. Ярмолюк, В. Кравчинский // Наука в России. – 2013. – № 6 (198). – С. 10–19.

14. Ulrich R.K. Very Long Lived wave Patterns Detected in the Solar Surface Velocity Signal / R.K. Ulrich // The Astrophys. – 2001. – V. 560. – P. 466–475.

15. Gizon L. Wave-like Properties of Solar Supergranulation / L. Gizon, T.L. Duvall, J. Schou // Nature. – 2003. – V. 421. – P. 43–44.

16. Zlebcik R. Space-time Segmentation Method for Study of the Vertical Structure and Evolution of Solar Supergranulation from data provided by local helioseismolody / R. Zlebcik, M. Svanda, M. Klvana // New Astronomy. – 2011. – V. 16. – P. 1–5.

17. Hathaway D.H. Giant Convection Cells Found on the Sun / D.H. Hathaway, L. Upton, O. Colegrove // Science. – 2013. – V. 342, N 6163. – P. 1217–1219.

18. Rast M.P. The Scales of Granulation, Mesogranulation and Supergranilation / M.P. Rast // The Astrophys. J. – 2003. – V. 597. – P. 1200–1210.

19. Brookes J.R. The Search for Solar Oscillations, 1974 to 1976 / J.R. Brookes, G.R. Isaak, C.P. McLeod et. al. // Mon. Not. R. Astr. Soc. – 1978. – V. 184. – P. 759–767.

20. Воронцов С.В. Собственные колебания Солнца и планет-гигантов / С.В. Воронцов, В.Н. Жарков // УФН. – 1981. – Т. 134, № 4. – С. 675–709.

21. Elsworth Y.P. The 160 Minute Solar Oscillation: an Artifact? / Y.P. Elsworth, S.M. Jefferies, C.P. McLeod et.al. // The Astrophys. J. – 1989. – V. 338. – P. 557–562.

22. De Pontieu B. A Tale of Two Spicules: The Impact of Spicules on the Magnetic Chromosphere / B. De Pontieu, S. McIntosh, V.H. Hansteen et.al. // Publ. Astron. Soc. Japan. – 2007. – V. 59. – P. S655–S662.

23. Ткачев И.И. Наблюдение эффекта Грейзена – Зацепина – Кузьмина обсерваторией Telescope Array / И.И. Ткачев // УФН. – 2011. – Т.181, № 9. – С. 990–997.

24. Птускин В.С. Происхождение космических лучей / В.С. Птускин // УФН. – 2010. – Т. 180, № 9. – С. 1000–1004.

25. Филоненко А.Д. Радиастрономический метод измерения потоков космических частиц сверхвысокой энергии / А.Д. Филоненко // УФН. – 2012. – Т. 182, № 8. – С. 793–827.

26. Заспа Ю.П. Контактне динамо як генератор когерентних космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної та метагалактичної енергії та магнетизму. Частина VI / Ю.П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1. – С. 221–231.

27. Ряжская О.Г. Нейтрино от гравитационных коллапсов звезд: современный статус эксперимента / О.Г. Ряжская // УФН. – 2006. – Т.176, № 10. – С. 1039–1050.

28. Kotov V.A. 160 Minute Solar Variations and the 22 Year Cycle / V.A. Kotov, T.T. Tsap // Solar Phys. – 1990. – V. 128. – P. 269–280.

29. 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.

30. Акт технического расследования причин аварии, происшедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества «Русгидро» / Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожнего. – Ростехнадзор, 2009. – 70 с.

31. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций / Брызгалов В.И. – СШГЭС, 1999. – 561 с.

32. Марчук А.Н. Геологические и геодинамические аспекты в комплексе причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС / А.Н. Марчук, Н.А. Марчук // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 48–57.

33. Лобановский Ю.И. Гидроакустический бустинг – способ возбуждения катастрофических автоколебаний в напорной системе Саяно-Шушенской ГЭС [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://synerjietics.ru/article/busting.htm

34. Инженерно-сейсмологические исследования зданий и крупных промышленных сооружений с использованием мощных вибрационных источников [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://org.sscc.ru/attachments/013-ch-10c.pdf

35. Мирнов С.В. Токамаки: триумф или поражение? / С.В. Мирнов // Природа. – 1999. – № 12. – С. 26–37.

36. Ладынин А.В. Дипольные источники главного геомагнитного поля / А.В. Ладынин // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 4. – С. 634–649.

37. Зеленый Л.М. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики / Л.М. Зеленый, А.В. Милованов // УФН. – 2004. – Т. 174, № 8. – С. 809–852.

38. Засов А.В. Темная материя в галактиках / А.В. Засов, А.С. Сабурова, А.В. Хоперсков, С.А. Хоперсков // УФН. – 2017. – Т.187, № 1. – С. 3–44.

39. Раздобурдин Д.Н. Транзиентная динамика возмущений в астрофизических дисках / Д.Н. Раздобурдин, В.В. Журавлев // УФН. – 2015. – Т. 185, № 11. – С. 1129–1161.

References

1. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoi, soniachnoi, halaktychnoi ta metahalaktychnoi enerhii ta elektromahnetyzmu. Chastyna VII / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. – 2017. – # 3. – S. 212–221.

2. Elzasser V.M. Mahnytnaia hydrodynamyka / V.M. Elzasser // UFN. – 1958. – T. LXIV, # 3. – S. 529–588.
3. Syrovatskyi S.Y. Mahnytnaia hydrodynamyka / S.Y. Syrovatskyi // UFN. – 1957. – T. LXII, # 3. – S. 247–303.
4. Sokolov D.D. Dynamo: na puty ot astrofyzycheskykh modelei k laboratornomu eksperymentu / D.D. Sokolov, R.A. Stepanov, P.H. Fryk // UFN. – 2014. – T. 184, # 3. – S. 313–335.
5. Fyzycheskaia entsyklopedyia : v 5 t. / pod. red. A.M. Prokhorova. – M. : Bolshaia ross. ents., 1999. – 760 s.
6. Landau L.D. Elektrodynamyka sploshnykh sred / Landau L.D., Lyfshyts E.M. – M. : Nauka, 1982. – 660 s.
7. Landau L.D. Teoryia polia / Landau L.D., Lyfshyts E.M. – M. : Nauka, 1988. – 512 s.
8. Savelev Y.V. Osnovy teoretycheskoi fyzyky / Savelev Y.V. – M. : Nauka, 1991. – 496 s.
9. Landau L.D. Hydrodynamyka / Landau L.D., Lyfshyts E.M. – M. : Nauka, 1986. – 736 s.
10. Bondur V.H. Vnutrennye volny na materykovom y ostrovnom shelfakh otkrytoho okeana: sravnytelnyi analyz na prymere nabliudenyi na Niu-Yorkskom y Havaiskom shelfakh / V.H. Bondur, Yu.V. Hrebeniuk, K.D. Sabynyn // Yzvestyia RAN. Fyzyka otmosfery y okeana. – 2010. – T. 46, # 5. – S. 694–702.
11. Bondur V.H. Anomalnaia yzmenchyvost ynertsyonnykh kolebanyi okeanskykh vod na Havaiskom shelfe / V.H. Bondur, K.D. Sabynyn, Yu.V. Hrebeniuk // DAN. – 2013. – T. 450, # 1. – S. 100–104.
12. Yaroshchuk Y.O. Eksperymentalnye yssledovanyia vnutrennykh voln v prybrezhnoi zone Yaponskoho moria / Y.O. Yaroshchuk, A.P. Leontev, A.V. Kosheleva // Podvodnye yssledovanyia y robototekhnyka. – 2013. – # 1 (15). – S. 37–44.
13. Kuzmyn M. Hlubynnaia heodynamyka – osnovnoi mekhanyzm razvytyia Zemly / M. Kuzmyn, V. Yarmoliuk, V. Kravchynskyi // Nauka v Rossyy. – 2013. – # 6 (198). – S. 10–19.
14. Ulrich R.K. Very Long Lived wave Patterns Detected in the Solar Surface Velocity Signal / R.K. Ulrich // The Astrophys. – 2001. – V. 560. – P. 466–475.
15. Gizon L. Wave-like Properties of Solar Supergranulation / L. Gizon, T.L. Duvall, J. Schou // Nature. – 2003. – V. 421. – P. 43–44.
16. Zlebcik R. Space-time Segmentation Method for Study of the Vertical Structure and Evolution of Solar Supergranulation from data provided by local helioseismolody / R. Zlebcik, M. Svanda, M. Klvana // New Astronomy. – 2011. – V. 16. – P. 1–5.
17. Hathaway D.H. Giant Convection Cells Found on the Sun / D.H. Hathaway, L. Upton, O. Colegrove // Science. – 2013. – V. 342, N 6163. – P. 1217–1219.
18. Rast M.P. The Scales of Granulation, Mesogranulation and Supergranilation / M.P. Rast // The Astrophys. J. – 2003. – V. 597. – P. 1200–1210.
19. Brookes J.R. The Search for Solar Oscillations, 1974 to 1976 / J.R. Brookes, G.R. Isaak, C.P. McLeod et. al. // Mon. Not. R. Astr. Soc. – 1978. – V. 184. – P. 759–767.
20. Vorontsov S.V. Sobstvennye kolebanyia Solntsa y planet-hyhantov / S.V. Vorontsov, V.N. Zharkov // UFN. – 1981. – T. 134, # 4. – S. 675–709.
21. Elsworth Y.P. The 160 Minute Solar Oscillation: an Artifact? / Y.P. Elsworth, S.M. Jefferies, C.P. McLeod et.al. // The Astrophys. J. – 1989. – V. 338. – P. 557–562.
22. De Pontieu B. A Tale of Two Spicules: The Impact of Spicules on the Magnetic Chromosphere / B. De Pontieu, S. McIntosh, V.H. Hansteen et.al. // Publ. Astron. Soc. Japan. – 2007. – V. 59. – P. S655–S662.
23. Tkachev Y.Y. Nabliudenye effekta Hreizena – Zatsepyna – Kuzmyna observatoryei Telescope Array / Y.Y. Tkachev // UFN. – 2011. – T.181, # 9. – S. 990–997.
24. Ptuskyn V.S. Proyskhozhdenye kosmycheskykh luchei / V.S. Ptuskyn // UFN. – 2010. – T. 180, # 9. – S. 1000–1004.
25. Fylonenko A.D. Radyastronomycheskyi metod yzmerenyia potokov kosmycheskykh chastyts sverkhvysokoi enerhyy / A.D. Fylonenko // UFN. – 2012. – T.182, # 8. – S. 793–827.
26. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoi, soniachnoi, halaktychnoi ta metahalaktychnoi enerhii ta mahnetyzmu. Chastyna VI / Yu.P. Zaspa // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2017. – # 1. – S. 221–231.
27. Riazhskaia O.H. Neitryno ot hravytatsyonnykh kollapsov zvezd: sovremennyi status eksperymenta / O.H. Riazhskaia // UFN. – 2006. – T.176, # 10. – S. 1039–1050.
28. Kotov V.A. 160 Minute Solar Variations and the 22 Year Cycle / V.A. Kotov, T.T. Tsap // Solar Phys. – 1990. – V. 128. – P. 269–280.
29. Zaspa Yu.P. Kontaktne dynamo yak henerator koherentnykh kosmichnykh form rukhu ta dzherelo planetarnoho, soniachnoho i halaktychnoho mahnetyzmu. Chastyna I / Yu.P. Zaspa // Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. – 2015. – # 5(229). – S. 106–118.
30. Akt tekhnycheskoho rassledovanyia prychyn avaryy, proysshedshei 17 avhusta 2009 hoda v fylyale Otkrytoho Aktsyonernoho Obshchestva «Rushydro» / Saiano-Shushenskaia HES ymeny P.S. Neporozhneho. – Rostekhnadzor, 2009. – 70 s.
31. Bryzghalov V.Y. Yz opyta sozdanyia y osvoenyia Krasnoiarskoi y Saiano-Shushenskoi hydroelektrostantsyi / Bryzghalov V.Y. – SShHES, 1999. – 561 s.
32. Marchuk A.N. Heolohycheskye y heodynamycheskye aspekty v komplekse prychyn avaryy na Saiano-Shushenskoi HES / A.N. Marchuk, N.A. Marchuk // Hydrotekhnycheskoe stroytelstvo. – 2012. – # 1. – S. 48–57.
33. Lobanovskyi Yu.Y. Hydroakustycheskyi bustynh – sposob vozbuzhdenyia katastrofycheskykh avtokolebanyi v napornoi systeme Saiano-Shushenskoi HES [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://synerjietics.ru/article/busting.htm
34. Ynzhenerno-seismolohycheskye yssledovanyia zdanyi y krupnykh promyshlennykh sooruzhenyi s yspolzovanyem moshchnykh vybratsyonnykh ystochnykov [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://org.sscc.ru/attachments/013-ch-10c.pdf
35. Myrnov S.V. Tokamaky: tryumf yly porazhenye? / S.V. Myrnov // Pryroda. – 1999. – # 12. – S. 26–37.
36. Ladynyn A.V. Dypolnye ystochnyky hlavnoho heomahnytnoho polia / A.V. Ladynyn // Heolohyia y heofyzyka. – 2014. – T. 55, # 4. – S. 634–649.
37. Zelenyi L.M. Fraktalnaia topolohyia y strannaia kynetyka: ot teoryy perkoliatsyy k problemam kosmycheskoi elektrodynamyky / L.M. Zelenyi, A.V. Mylovanov // UFN. – 2004. – T.174, # 8. – S. 809–852.
38. Zasov A.V. Temnaia materyia v halaktykakh / A.V. Zasov, A.S. Saburova, A.V. Khoperskov, S.A. Khoperskov // UFN. – 2017. – T.187, # 1. – S. 3–44.
39. Razdoburdyn D.N. Tranzyentnaia dynamyka vozmushchenyi v astrofyzycheskykh dyskakh / D.N. Razdoburdyn, V.V. Zhuravlev // UFN. – 2015. – T.185, # 11. – S. 1129–1161.

Рецензія/Peer review : 18.09.2017 р. Надрукована/Printed :27.10.2017 р.

УДК 62-523.8

Б.М. ЗЛОТЕНКО, Д.В. СТАЦЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ І ТЕМПЕРАТУРОЮ ПРИМІЩЕНЬ

Стаття присвячена вдосконаленню систем керування освітленням і температурою приміщення на основі використання апаратної обчислювальної платформи Arduino. Використано метод експериментального дослідження, метод комп'ютерного моделювання програматора Arduino. Вдосконалена система керування освітленням та температурою дозволяє покращити енергоефективність приміщень у світлий час доби при високих температурах оточуючого середовища. Отримані результати випробувані на експериментальному стенді. Розроблено та виготовлено експериментальний зразок стенду для моделювання режимів роботи системи керування освітленням та температурою приміщень.

***Ключові слова**: температура, освітленість, сервопривод, мікроконтролер, Arduino.*

B.M. ZLOTENKO, D.V. STATSENKO
Kiev National University of Technology and Design

IMPROVEMENT OF THE ENERGY EFFICIENT LIGHTING AND TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR PREMISES

The article is devoted to the improvement of temperature control and lighting systems on the basis of Arduino hardware platform. Today, when creating energy-efficient premises, the question arises about the development and improvement of modern lighting systems with the rational use of sunlight. The method of experimental research, the method of computer modelling of the Arduino programmer, was used in this article. The improved lighting and temperature control system allows you to improve the energy efficiency of the premises during daylight hours at high temperatures of the surrounding environment. The results obtained were tested on an experimental stand. The dependencies for different modes of operation of lighting control systems and the room temperature during light time weather at high ambient temperatures are established. The use of an improved lighting and temperature control system allows improving the energy efficiency of the premises during the daylight hours at high ambient temperatures. The proposed system allows reducing the indoor temperature by an average of 4°C.

***Keywords:** temperature, lighting, servo-drive, microcontroller, Arduino.*

Вступ

На сьогоднішній день, при створенні енергоефективних приміщень, постає питання розробки та вдосконалення сучасних систем освітлення з раціональним використанням сонячного світла. Такі системи керування все ще недостатньо поширені в багатьох країнах світу, хоча вони зменшують споживання електроенергії, а також покращують тепловий та візуальний комфорт мешканців та працівників приміщень в яких вони встановлені. Ефективне керування такими системами може призвести до того, що в зимовий період буде зменшуватись кількість споживаної енергії на опалення приміщень, а в літній, відповідно, для охолодження приміщення.

Метою даної роботи є вдосконалення систем керування освітленням і температурою приміщення на основі використання апаратної обчислювальної платформи Arduino.

Аналіз досліджень та публікацій

В залежності від пори року та часу дня змінюється інтенсивність сонячного світла. На рис. 1 зображено інтенсивність сонячного опромінення вертикальної поверхні будівлі влітку (21 червня) та взимку (21 грудня) від часу доби, на 50° північної широти без урахування хмарності та оточуючих будівель, чи природних об'єктів [1–4].

Виходячи з аналізу результатів даних наведених на рис. 1. Зроблені наступні висновки: північний фасад будинку отримує найменшу кількість сонячного опромінення, східний та західний мають симетричні результати, південний фасад отримує найбільшу інтенсивність опромінення.

На базі кафедри електромеханічних систем розроблено лабораторні стенди системи керування освітленням та температурою у приміщенні [5, 6]. Сутність роботи системи керування освітленням базується на використанні цифрового датчика температури, а саме, залежно від температури у приміщенні змінюється освітлюваність за рахунок контролю сонячного опромінення.

Формулювання цілей

Мета даної роботи полягає у вдосконаленні вищенаведених систем керування для збільшення ефективного споживання енергії у приміщенні при високих температурах оточуючого середовища, коли повітря охолоджується за рахунок роботи кондиціонера.

Експериментальна частина

На основі аналізу робіт [2–5], пов'язаних з розробкою системи керування положення ролетів та жалюзі встановлено декілька режимів роботи:

1. Режим «годинника»: система керування змінює положення жалюзі залежно від часу доби від 8:00 до 18:00.

2. Режим визначення температури зовнішнього середовища: жалюзі закриті на 50%, якщо температура повітря більша 23°С и повністю закриті, якщо температура більша 26°С.

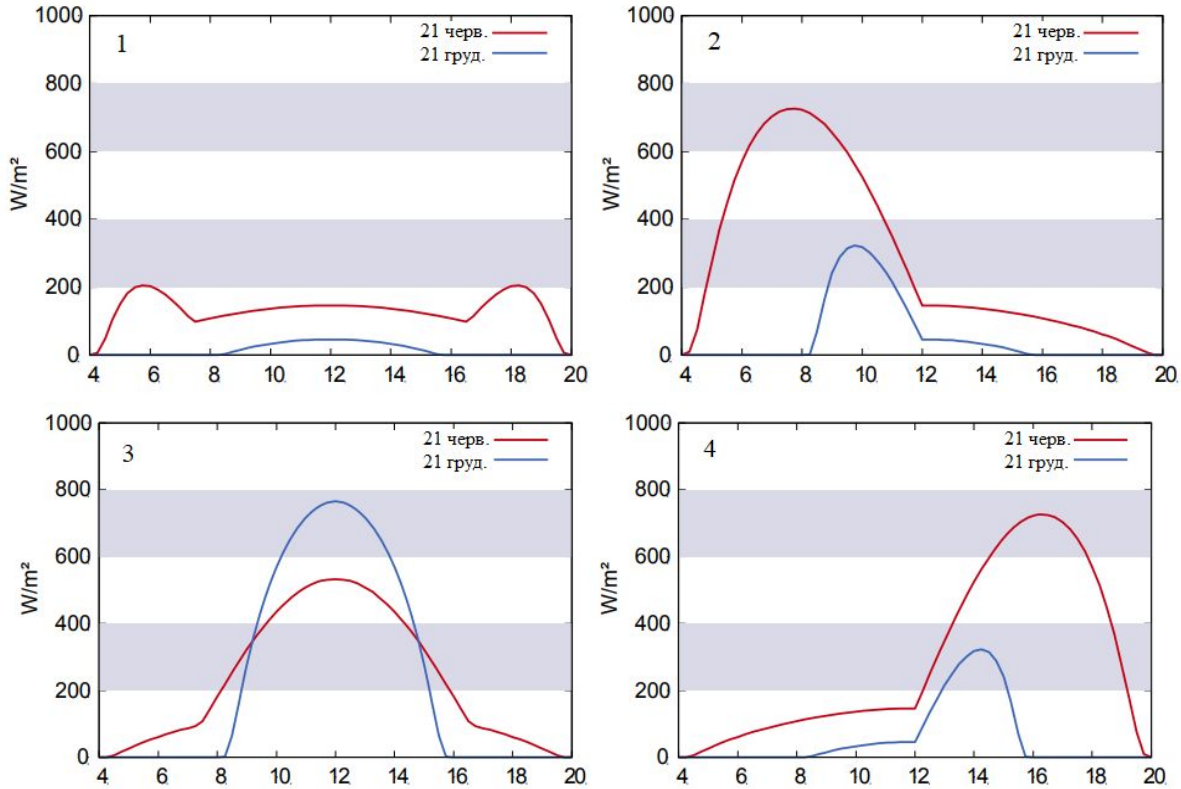


Рис. 1. Інтенсивність сонячного опромінення північного (1), східного(2), південного (3) та західного (4) фасаду будинку від часу доби

3. Режим «рівня освітлення»: жалюзі повністю закриті якщо інтенсивність освітлення перевищує 10000 Люкс, що відповідає ясному сонячному дню (в тіні).

Дані результатів проведених експериментів у трьох регіонах країни з використанням вищенаведених режимів наведені на рис. 2. Експеримент проведено влітку в трьох регіонах країни (північному, центральному, південному) при максимальній температурі оточуючого середовища.

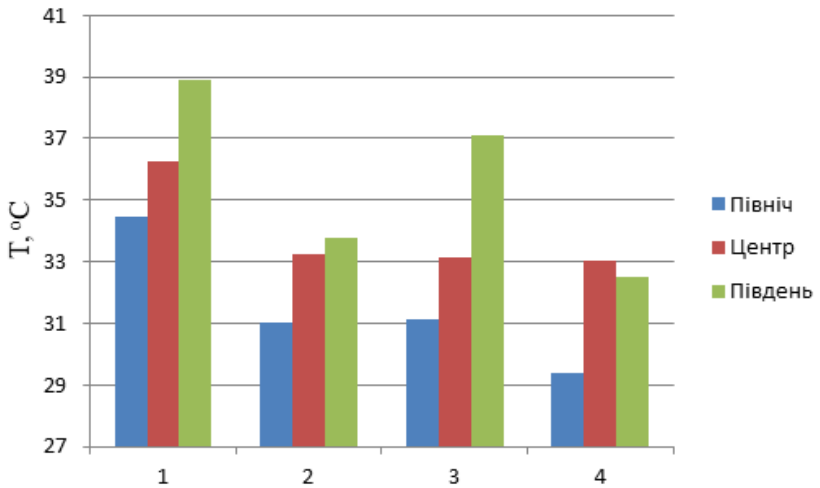


Рис. 2. Максимальна температура для різних режимів системи керування жалюзі:
1. Жалюзі повністю відкриті. 2. Режим «годинника». 3. Режим визначення температури. 4. Режим «рівня освітлення»

Детально дані експерименту наведено у табл. 1.

Аналіз результатів вищенаведених даних підтверджує, що використання систем керування температури та освітлення на основі регулювання положення жалюзі знижує температуру у приміщенні у всіх випадках.

Слід зазначити, що режим «рівня освітлення» є найбільш ефективним, оскільки забезпечує комфортну температуру та необхідне освітлення приміщення, коли рівень освітлення менший за 10000 Люкс, або фасад приміщення знаходиться у тіні.

Таблиця 1

Максимальна температура для різних режимів системи керування жалюзі

	Північ	Центр	Південь
Жалюзі повністю відкриті	**34,46°C**	**36,26°C**	**38,89°C**
Режим «годинника»	-3,41°C	-3,04°C	-5,13°C
Режим визначення температури	-3,31°C	-3,1°C	-1,78°C
Режим «рівня освітлення»	-5,05°C	-3,23°C	-6,37°C

Визначивши оптимальний режим роботи системи керування температурою і освітленням приміщення, здійснено вдосконалення існуючих систем, для підвищення їх енергоефективності при високих температурах оточуючого середовища.

В якості центрального контролера використано Arduino Uno (рис. 3). Arduino – апаратна обчислювальна платформа, основними компонентами якої є плата вводу-виводу та середовище розробки на мові програмування Wiring. Даний пристрій може працювати незалежно від персонального комп'ютера при наявності джерела живлення і альтернативного каналу зв'язку. Arduino здатний зчитувати вхідні дані у вигляді напруги на своїх аналогових виводах. Якщо до певних виводів пристрою підключити датчики, то пристрій буде програмним способом зчитувати інформацію з цих виводів.

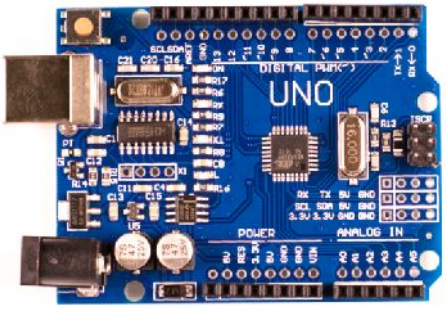


Рис. 3. Контролер Arduino Uno

В якості елемента, який буде контролювати зміну інтенсивності освітленості, використовується цифровий датчик освітлюваності BH1750FVI GY-302. У попередніх роботах для визначення освітлюваності використано фоторезистор серії GL55, але його недолік полягає у тому, що для точного визначення рівня необхідно розробити складну вимірювальну схему та калібрувати дані отримані з цього датчика.

Датчик BH1750FVI GY-302 завдяки цифровому інтерфейсу видає готові дані у визначених одиницях виміру. Він укладений в корпусі для поверхневого монтажу WSOF6I. Безпосередньо усередині сам фотодатчик у вигляді фотодіода, підсилювач сигналу фотодіода, АЦП (аналого-цифровий перетворювач) і логіка, яка обробляє дані та переводить все в одиниці виміру Люкс, потім передає по шині I2C до мікроконтролера.

Схема підключення має наступний вигляд (рис. 4).

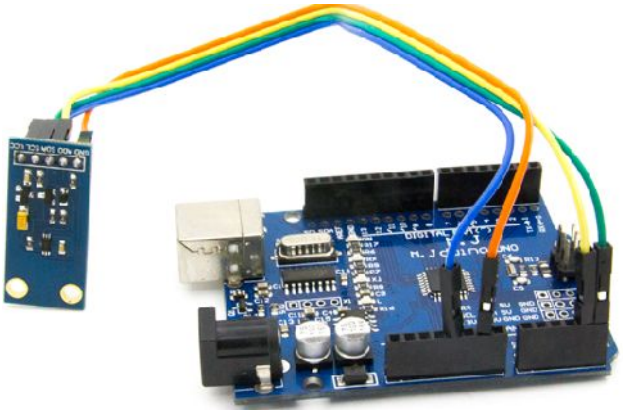


Рис. 4. Підключення датчика BH1750FVI GY-302 до контролера Arduino Uno

Для повороту жалюзі залежно від освітлення навколишнього середовища використовується сервопривод SG90 (рис. 5), його особливістю є компактний розмір і незначна вага (15 грамів), він на пряму підключається до контролера Arduino Uno, керування здійснюється через створену бібліотеку в Arduino IDE.

Сутність роботи даної системи базується на тому, що при високих температурах оточуючого

середовища залежно від інтенсивності освітлення жалюзі чи ролети будуть у відчиненому або зачиненому стані.

Коли здійснюється подача живлення на контролер Arduino Uno, вмикається датчик освітлюваності BH1750FVI GY-302, який за допомоги написаної програми буде визначати рівень освітлюваності. Якщо рівень освітлюваності перевищує або дорівнює 10000 Люкс жалюзі необхідно встановити у зачинений стан. В такому випадку контролер Arduino подає живлення через реле на сервопривод і встановлює положення вала сервопривода на 120 градусів, при якому жалюзі знаходяться у зачиненому стані, після чого він перериває подачу живлення. В іншому випадку, якщо освітленість в світлий проміжок часу недостатня, програма відправляє сигнал на сервопривод і встановлює положення вала сервопривода на 0 градусів, що відповідає відчиненому стану жалюзі.

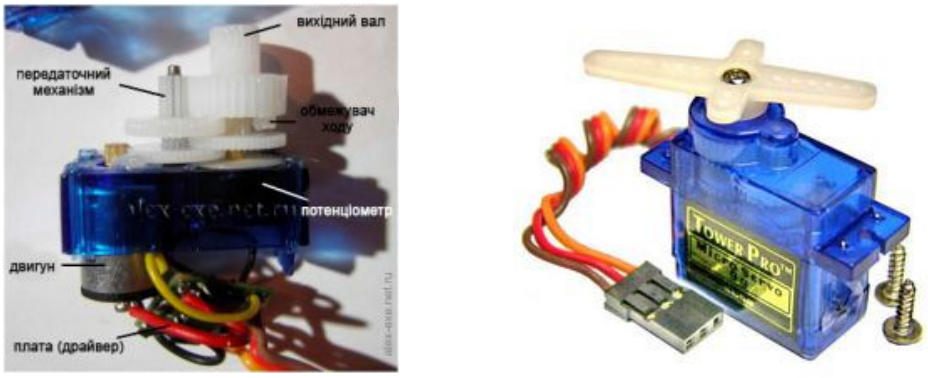


Рис. 5. Сервопривод SG90

У вечірній проміжок часу, коли необхідне додаткове освітлення у приміщенні, за допомогою тактового перемикача, встановлюється положення вала сервопривода на 120 градусів та вимикається приймання та обробка програмою сигналів з датчика освітлюваності BH1750FVI GY-302.

Висновки

Використання вдосконаленої системи керування освітленням та температурою дозволяє покращити енергоефективність приміщень у світлий час доби при високих температурах оточуючого середовища. Запропонована система дозволяє зменшити температуру у приміщенні у середньому на 4°C.

Література

1. Будинки і споруди. Методи вимірювання освітленості (ГОСТ 24940-96) : ДСТУ Б В.2.2-6-97. – [Чинний від 1998-01-01]. – (Національні стандарти України).

2. Heschong, L., Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment. Report prepared for the California Energy Commission. 2003.

3. Hartkopf, V., Loftness, V. Global relevance of total building performance, Automation in Construction 8. 1999. pp. 377-393.

4. Heschong, Mahone, Daylighting in Schools: An investigation into the relationship between daylighting and human performance. 1999.

5. Черниченко Ю.М. Інтелектуальна енергозберігаюча система керування температурою у приміщенні [Електронний ресурс] / Ю.М. Черниченко, Б.М. Злотенко // Технології та дизайн. – 2017. – № 1. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_1_8

6. Заєць Я. Б. Енергоефективна система керування мікрокліматом у приміщенні [Електронний ресурс] / Я. Б. Заєць, Б. М. Злотенко // Технології та дизайн. – 2017. – № 1. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_1_7

References

1. Budynky i sporudy. Metody vymiriuvannia osvitlenosti (HOST 24940-96) : DSTU B V.2.2-6-97. – [Chynnyi vid 1998-01-01]. – (Natsionalni standarty Ukrainy).

2. Heschong, L., Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment. Report prepared for the California Energy Commission. 2003.

3. Hartkopf, V., Loftness, V. Global relevance of total building performance, Automation in Construction 8. 1999. pp. 377-393.

4. Heschong, Mahone, Daylighting in Schools: An investigation into the relationship between daylighting and human performance. 1999.

5. Chernychenko Yu. M., Zlotenko B. M. Intelektualna enerhozberihaiucha systema keruvannia temperaturoiu u prymishchenni. Tekhnolohii ta dyzain. 2017. # 1. Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_1_8

6. Zaiets Ya. B., Zlotenko B. M. Enerhoefektyvna systema keruvannia mikroklimatom u prymishchenni. Tekhnolohii ta dyzain. 2017. # 1. Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2017_1_7

Рецензія/Peer review : 11.10.2017 р. Надрукована/Printed :31.10.2017 р.

УДК 004.056.55

С.В. КУЛИК, М.В. ЛЮТА
Київський національний університет технологій та дизайну
І.О. РОЗЛОМІЙ
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ QR-КОДУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Швидкий розвиток і вдосконалення інформаційних технологій призвів до необхідності розробки систем захисту авторського права та систем захисту від копіювання мультимедійної інформації, зокрема, графічних зображень. Практично повсюдне використання мережі Інтернет обертається легкістю доступу до розміщеної в ній інформації. Тому для захисту графічних зображень та авторських прав актуальними є методи стеганографії. В статті розглянуто спосіб накладання цифрового водяного знаку. Запропоновано метод вставки в зображення QR коду в якості інструменту захисту авторських прав. Використання даного методу має на меті покращити захист зображень та запобігти несанкціонованому доступу до них.

Ключові слова: графічні зображення, стеганографія, цифровий водяний знак, QR-код, iWatermark.

S.V. KULYK, M.V. LYUTA
Kyiv National University of Technologies and Design
I.O. ROZLOMII
Cherkasy Bohdan Khmelnytsky National University

STUDYING OF THE TECHNIQUES OF A QR-CODE USING TO PROTECT GRAPHIC IMAGES

The rapid development and improvement of information technology has led to the need to develop copyright protection systems and protection systems against the copying of multimedia information, in particular, graphic images. Virtually widespread use of the Internet is rotated by the ease of access to the information contained therein. Therefore, steganography methods are relevant to protect graphic images and copyrights. The article considers the method of digital watermarking. The method of inserting of QR-code into image as a copyright protection tool is proposed. The purpose of this method is to improve the protection of images and prevent unauthorized access to them.

Keywords: graphic images, steganography, digital watermark, QR-code, iWatermark.

Вступ. В наш час одним із способів захисту графічних зображень є стеганографія. Стеганографія – це спосіб передачі або зберігання інформації з урахуванням збереження в таємниці самого факту такої передачі (зберігання). На відміну від криптографії, яка приховує вміст таємного повідомлення, стеганографія приховує сам факт його існування. Як правило, повідомлення буде виглядати як що-небудь інше, наприклад, як зображення, стаття, список покупок або лист. Стеганографію зазвичай використовують спільно з методами криптографії, таким чином, доповнюючи її.

Перевага стеганографії над чистою криптографією полягає в тому, що повідомлення не привертають до себе уваги. Таким чином, криптографія захищає вміст повідомлення, а стеганографія захищає сам факт наявності будь-яких прихованих послань. Основним методом приховування інформації є цифровий водяний знак (ЦВЗ) [1].

Цифровий водяний знак – це спеціальна мітка, вбудована в цифровий контент (названий контейнером) з метою захисту авторських прав і підтвердження цілісності самого документа. ЦВЗ можна вбудовувати в електронні документи будь-якого типу [2, 3]. Поряд з різними зображеннями (фотографіями, малюнками, відсканованими паперовими документами і т.д.) зустрічаються і аудіозаписи, що несуть в собі ЦВЗ, і відео (наприклад, DVD-диски). ЦВЗ активно використовуються при розміщенні унікальних фотографій, відео, аудіотреков в електронному вигляді в глобальній мережі Інтернет. В якості ЦВЗ також може використовуватись QR код.

QR-код – товарний знак для типу матричних штрих-кодів (або двовимірних штрих-кодів), спочатку розроблених для автомобільної промисловості Японії. Штрих-код – це оптична мітка, що містить інформацію про об’єкт, до якого вона прив’язана [4].

Система QR-кодів стала популярною за межами автомобільної промисловості завдяки можливості швидкого зчитування і більшої місткості в порівнянні зі штрих-кодами стандарту UPC. Такі коди включають відстеження продукції, ідентифікацію предметів, відстеження часу, управління документами і загальний маркетинг.

QR-код складається з чорних квадратів, розташованих у квадратній сітці на білому тлі, які можуть зчитуватися за допомогою пристроїв обробки зображень, таких як камера, і оброблятися з використанням кодів Ріда – Соломона до тих пір, поки зображення не буде належним чином розпізнано. Потім необхідні дані витягуються з шаблонів, які присутні в горизонтальних і вертикальних компонентах зображення.

Постановка проблеми. Звичайні водяні знаки не зможуть забезпечити високий рівень захисту закодованої інформації. QR-код в цьому плані виділяється більшою надійністю та захищеністю. Наносити зображення QR-коду можна з різною прозорістю, кольором, розміром для мінімізації спотворень зображення. QR-код дозволить вирішити проблему забезпечення достовірності зображення та гарантії авторства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Досить багато публікацій присвячено розгляду проблеми забезпечення достовірності, гарантії авторства графічних зображень. Завданням пошуку ефективних механізмів захисту графічних зображень займалися такі вчені: Д.А. Нікулін, Ю.А. Бєлобокова, О.О. Євсютін, О.В. Негачова та інші. В працях Д.А. Нікуліна досліджено особливості нанесення цифрового водяного знаку на графічні зображення з метою захисту авторських прав [5]. Також варто відмітити роботи Ю.А. Белобокової, в яких запропоновано методи вбудовування ЦВЗ в цифрові фотографії [6]. Проте, ще залишаються питання, які потребують подальшого доопрацювання та вивчення. Зокрема, до тепер мало уваги приділялося застосуванню технології нанесення QR-коду для захисту графічних зображень.

Формулювання цілей статті. Метою роботи дослідження принципів нанесення QR-коду для захисту графічних зображень від несанкціонованого доступу та захисту авторських прав.

Виклад основного матеріалу. Програмне забезпечення, призначене для захисту авторських прав на графічні роботи, складає інтерес для фахівців, що займаються дизайном, фотографією, графікою і т.п., яким необхідно, з одного боку, представляти свої роботи потенційному замовнику, а з іншого боку, бути застрахованими від можливого порушення авторських прав, пов'язаного з незаконним використанням їх робіт.

Інтернет і авторські права не сумісні між собою в принципі. Сучасне авторське право до сих пір побудовано на праві автора заборонити використання твору, що в інтернеті неможливо в силу природи мережі. Інтернет – це свобода, авторське право – це обмеження. Всі проблеми виходять з цього фундаментального протиріччя. З використанням мережі відбуваються найрізноманітніші правопорушення:

- плагіат;
- незаконна торгівля об'єктами прав інтелектуальної власності;
- торгівля контрафактною продукцією через інтернет-магазини.

В даний час автори змушені представляти портфоліо, яке часто містить зменшені цифрові зображення, якість яких спеціально занижено, що не дозволяє в повній мірі оцінити їхні переваги. У зв'язку з цим, додаток, що дозволяє надати зображення в оригінальному форматі, але без можливості їх копіювання, представляє значний практичний інтерес для широких кіл фахівців, що працюють в області дизайну, фотографії, digital art і т.д.

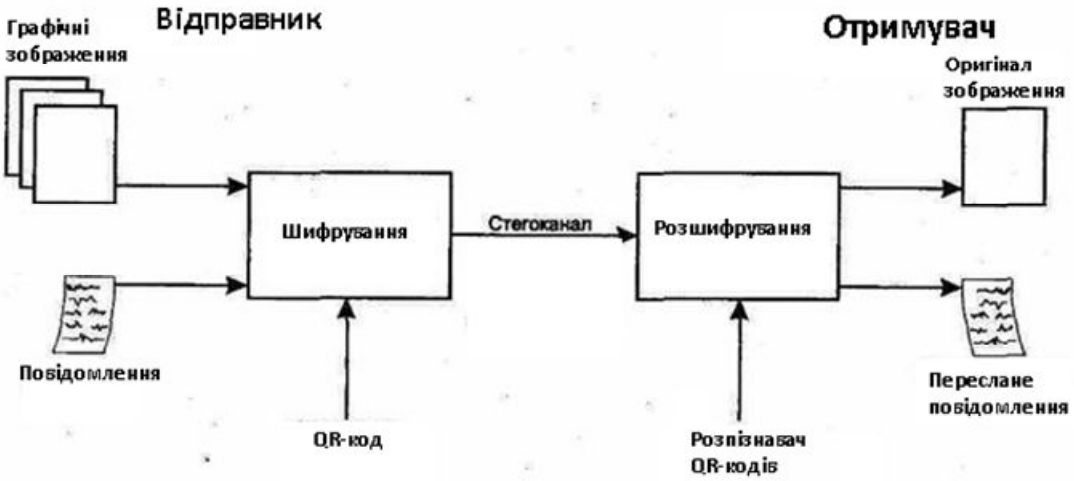


Рис. 1. Накладання QR-коду у вигляді цифрового водяного знаку

Програма для захисту графічних файлів має швидко працювати з великими обсягами інформації (якісні графічні файли мають великий обсяг) і забезпечувати контроль доступу до цієї інформації. При цьому зображення не повинно бути доступно в незахищеному вигляді ні на одному з етапів його передачі.

Схему накладання QR-коду у вигляді цифрового водяного знаку показано на рис. 1.

QR-код з'явився в 1994 році в Японії. Створений дослідниками Denso-Wave (дочірня компанія «Toyota»), цей двовимірний, або матричний, штрих-код застосовувався спочатку для ідентифікації автозапчастин на заводах корпорації, але швидко знайшов популярність за межами виробничих ліній. Абревіатура QR означає Quick Response, тобто «Швидкий відгук». Особливість даного типу кодів в тому, що вони легко розшифровуються не тільки за допомогою спеціального сканера, але і за допомогою будь-якого смартфона, оснащеного фотокамерою і досить простим програмним забезпеченням, що відкриває завидні перспективи його застосування в повсякденному житті. Хоча термін QR код як і раніше є зареєстрованим товарним знаком DENSO Corporation, використання кодів не обкладається жодними ліцензійними відрахуваннями, а самі вони описані і опубліковані в якості стандартів ISO.

У QR-коді кодується різноманітна інформація, яка складається із символів (включаючи кирилицю, цифри і спеціальні символи), наприклад: електронна візитка, координати місця розташування, інтернет-адреса, контактні дані, адреса електронної пошти, SMS, текст, телефонні номери. Один QR-код може містити цифри – 7089, цифри і букви (Латиниця) – 4296, двійковий код – 2953 байт (отже, близько 2953

літер кирилиці в кодуванні windows – 1251 або близько 1450 літер кирилиці в utf-8), ієрогліфи – 1817.

Вигляд так структура QR-коду зображено на рис. 2.

Зараз існує багато різних програм для вбудовування водяних знаків різного типу. Для вбудовування qr-коду в графічне зображення можна використати програму iWatermark, яка дозволить вбудовувати в графічні зображення водяні знаки. Однією з функцій цієї програми є також і генерування в QR-коду та вбудовування його в зображення. iWatermark Pro для Mac та Windows може працювати з Lightroom, Photoshop, Picasa, ACDSee, Cumulus, Portfolio, PhotoStation, Xee, iView, PhotoMechanic та іншими організаторами фотографій.

Спочатку користувач вільний обирати який тип водяного знаку він хоче використовувати для захисту зображення. Типи водяних знаків та програма зображені на рис. 3. В даному випадку обираємо водяний знак у вигляді QR-коду.

Рис. 2. Вигляд та структура QR-коду

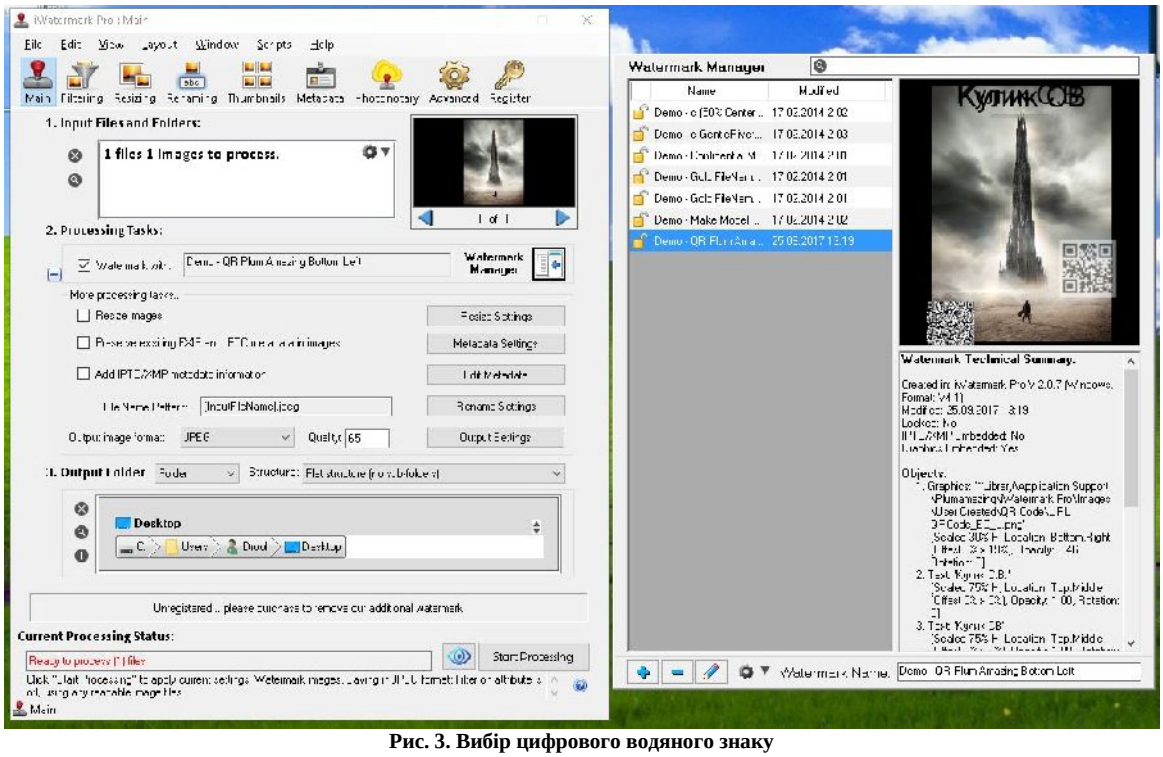


Рис. 3. Вибір цифрового водяного знаку

Далі користувач може надрукувати будь-який текст, який буде закодований у QR-коді. Також він може вибрати розмір коду, прозорість та його розташування на зображенні. Це зображено на рис. 4. Також на рис. 5 зображено різні види QR-коду, які пропонує програма на вибір користувачеві.

iWatermark – це один з найпростіших і в той же час досить багатофункціональних інструментів для додавання друкованих водяних знаків в малюнки, цифрові фотографії та інші зображення. Програма підтримує всі поширені формати зображень і дозволяє додати до знімків і підпис, і логотип, в тому числі одночасно. Для тексту допустимо зміна шрифту, його розміру і накреслення, а для логотипу, якщо він задіяний разом з текстом, можна вибрати положення відносно тексту: над текстом, під текстом, ліворуч або праворуч від нього. Крім того, для водяного знаку можна визначити ступінь прозорості (в тому числі зробити його невидимим), положення на знімку, повернути його під будь-яким кутом, змінити розмір і

накласти один з ефектів: тінь, обведення, карбування та ін. При бажанні можна, наприклад, пустити логотип через все зображення, багато разів повторюючи його в певному порядку. При цьому iWatermark не буде переписувати оригінальні файли, а просто створить послідовну копію зображення в попередньо зазначеній папці. Програма підтримує пакетну обробку файлів, однак в демонстраційній версії дана можливість не працює.

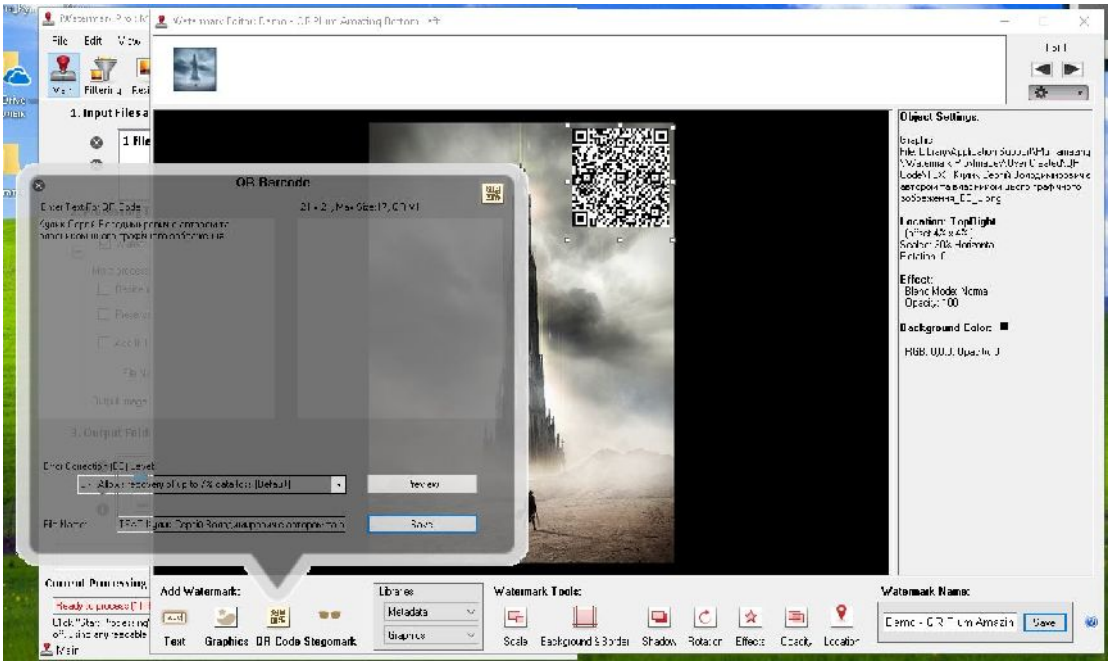


Рис. 4. Інформація, що кодується в QR-коді

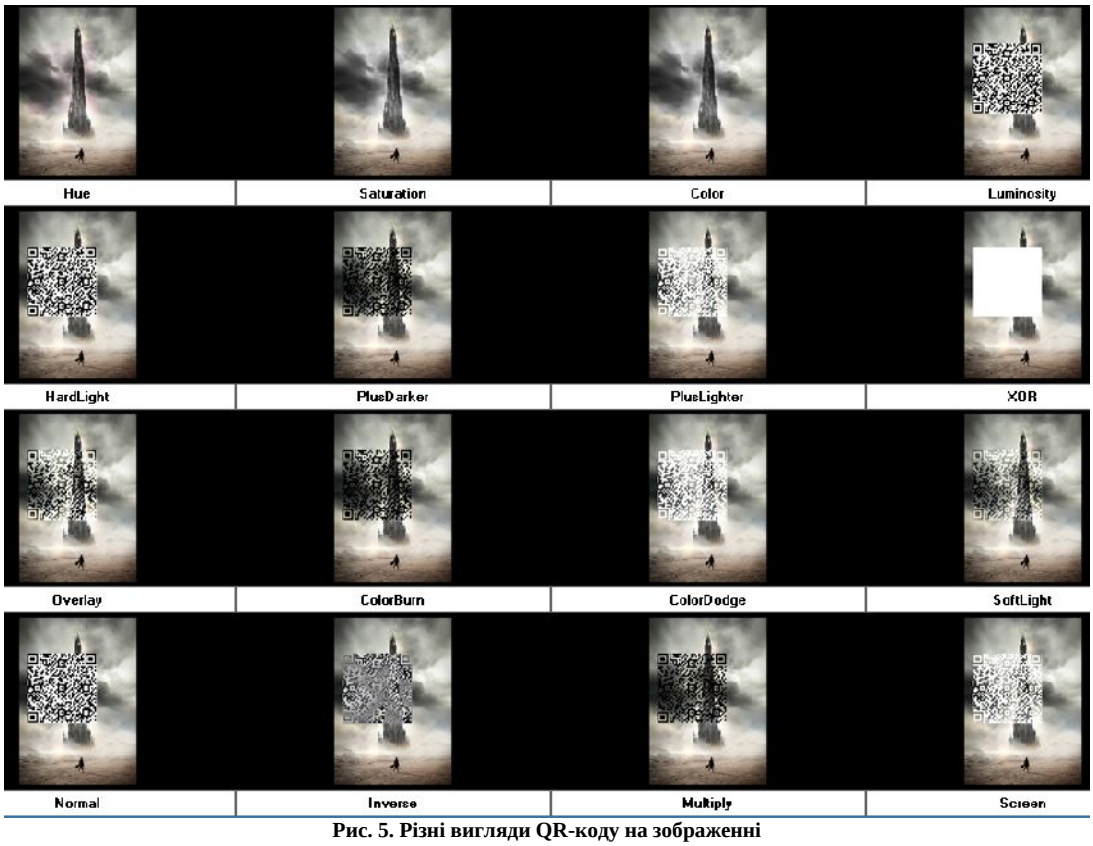


Рис. 5. Різні вигляди QR-коду на зображенні

Після обробки маємо зображення з готовим нанесеним QR-кодом на зображенні. Готове зображення показано на рис. 6.

Рис. 6. Готове зображення з нанесеним QR-кодом

Висновки. В даній роботі було розкрито особливості захисту графічних зображень за допомогою стеганографії, зокрема цифрового водяного знаку. Було розглянуто використання QR-коду в якості ЦВЗ. Було визначено що QR-код є більш ефективним методом захисту авторських прав на графічні зображення. В якості програми, що вставляє в зображення розглянутий код, використовувався додаток iWatermark. З її допомогою можна ефективно вставляти в зображення не тільки QR-коди, а й інші цифрові водяні знаки. Дана програма є простим і водночас ефективним методом захисту графічних зображень.

Література

1. Коханович Г.Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Коханович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. – Киев : МК-Пресс, 2006. – 288 с.
2. Стеганография, цифровые водяные знаки и стегоанализ / Аграновский А.В., Балакин А.В., Грибунин В.Г., Сапожников С.А. – М. : Вузовская книга, 2009. – 220 с.
3. Cox, I.J. Digital watermarking and steganography / I.J. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishing, 2008. – 624 p.
4. Wang S. Does a QR-code must be black and white? // 2015 International Conference on Orange Technologies (ICOT). – IEEE, 2015. – pp. 161–164.
5. Никулин Д.А. Особености применения машиночитаемых ЦВЗ для защиты авторських прав на изображение / Д.А. Никулин // Таврический научній обозреватель. Технические науки. – 2016. – № 7(12). – С. 137–140.
6. Грачева Ю.А. (Белобокова). Применение цифровых водяных знаков для защиты цифровых фотографий / Ю.А. Грачева // Новые информационные технологии в автоматизированных системах : материалы 14 научно-практ. семинара. – М. : МИЭМ, 2011. – С. 52–57.

References

1. Kokhanovich, G.F. and Pusyrenko, A.Y. (2006) Computer steganography. Theory and practice. Kiev: MK-Press, 288 p.
2. Agranovsky, A.V., Balakin, A.V., Gribunin, V.G. and Sapozhnikov, S.A. (2009) Steganography, digital watermarks and steganalysis. Moscow: University book, 220 p.
3. Cox, I., Miller, M., Bloom, J. and Fridrich, J. (2008) Digital watermarking and steganography. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishing, 624 p.
4. Wang S. (2015) Does a QR-code must be black and white? International Conference on Orange Technologies (ICOT). IEEE, pp. 161–164.
5. Nikulin D.A. (2016) The peculiarities of the use of machine-readable digital photo frames for the protection of copyright of images. Taurian Scientific Observer. Technical sciences, 7 (12), pp. 137–140.
6. Gracheva Yu.A. (Belobokova) (2011) Using of digital watermarks to protect digital photos. New information technologies in automated systems. Materials of 14 scientific and practical workshops. Moscow: MIEM, pp. 52–57.

Рецензія/Peer review : 06.09.2017 р. Надрукована/Printed :26.10.2017 р.

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 протокол № 3 від 28.09.2017 р.

Підп. до друку 11.10.2017 р. Ум.друк.арк. 28,53 Обл.-вид.арк. 27,14
Формат 30х42/4, папір офсетний. Друк різографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63