ISSN 2307-5732

Науковий журнал

4.2017

ВІСНИК
Хмельницького національного університету

Технічні науки
Technical sciences

Scientific Journal

Herald of Khmelnytskyi National University

2017, Issue 4, Volume 251

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, № 4 (251)

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 № 1 від 31.08.2017 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

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, М.И. СУББОТИНА
К ИССЛЕДОВАНИЮ КИНЕМАТИКИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА 7

В.С. НЕЙМАК, О.С. ПОЛІЩУК, Г.Ф. ВОРОНІН, Т.П. РОМАНЕЦЬ
ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУБЧАСТО-ВАЖІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ПРИВОДУ ПАЗОВИХ ГОЛОК ОСНОВОВ'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТУ ПРАНС-ПК 10

О.М. ПИЛИПЕНКО, О.В. БАТРАЧЕНКО, І.М. ЛИТОВЧЕНКО
ОБҐРУНТУВАННЯ НОВОГО СПОСОБУ ЗМЕНШЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ СІДЕЛЬНИХ АВТОПОТЯГІВ 14

М.М. КОСІЮК, С.А. КОСТЮК
УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КУЛЬОВОГО ШАРНІРА ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ 20

С.В. МАЗУР, В.М. СТРІЛЕЦЬ, О.Р. СТРІЛЕЦЬ, О.Ю. ТИМЕЙЧУК
ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ З КАНАВКОЮ НА ТОРЦІ ОБЕРТОВОГО КІЛЬЦЯ У ВИГЛЯДІ СПІРАЛІ АРХІМЕДА 26

О.В. БАТРАЧЕНКО
МЕТОДОЛОГІЧНА КОНЦЕПЦІЯ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В МАШИНОБУДУВАННІ 32

А.О. РАМСЬКИЙ
АСИМПТОТИКА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ДЛЯ ПЛИТИ, ПОКРИТОЇ ШАРОМ ІЗ ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ 41

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, С.А. РОМАШКЕВИЧ
КИНЕТОСТАТИКА МОДИФИКАЦИЙ ГРУПП АССУРА ТРЕТЬЕГО КЛАССА ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА. ЧАСТЬ 1. МОДИФИКАЦИИ С ОДНОЙ И ДВУМЯ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМИ 45

І.Г. ДОБРОТВОР, І.В. ЧИХІРА, І.Т. ЯРЕМА
УМОВИ КОЛИВНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК КІНЕТИКИ МІКРОСТРУКТУР КОМПОЗИТІВ 52

Д.В. СТЕПАНОВ, Н.В. ПАЛАМАРЧУК, Ю. Я. СПРИНЧУК
ТРИГЕНЕРАЦІЙНА БІОГАЗОВА УСТАНОВКА 56

Л.В. НАКАШИДЗЕ, Т.В. ГІЛЬОРМЕ
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, У ЯКИХ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ 60

Л.Б. ДЕМИДЧУК, Д.І. САПОЖНИК
ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРО- ТА ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ ПОВЕРХНЕВОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ 65

В.А. ГОНЧАР
ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В СТАЛІ 20 ТА ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ НА ЇХ ВЕЛИЧИНУ 69

О.М. СИНЮК, Н.К. МЕДВЕДЧУК
ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС ВПЛИВУ НА НЬОГО НАПРУЖЕНЬ ЗСУВУ 73

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

К.С. СТАДНІК, О.А. ОХМАТ, В.А. ПАЛАМАР
ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНИХ МІНЕРАЛІВ У ШКІРЯНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ 81

Т.І. КУЛІК
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ 85

Л.В. ПОЛІЩУК, О.В. КАЛАШНИК, О.В. КИРИЧЕНКО, С.Е. МОРОЗ
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СТОЛОВОЇ БІЛИЗНИ, ЩО ІМПОРТУЄТЬСЯ В УКРАЇНУ 90

В.В. МИЦА, О.М. ДОМБРОВСЬКА
ВИКОРИСТАННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ОДЯГУ ДЛЯ ДІТЕЙ 97

П.Ф. ЗОЗУЛЯ, О.С. ПОЛІЩУК, А.О. ПОЛІЩУК
ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ В ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ 102

Н.М. ЛИТВИНЕНКО
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ ТРИКОТАЖУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ОДЯГУ ДЛЯ ВАГІТНИХ З ПІДТРИМУЮЧИМ ЕФЕКТОМ 105

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Л.В. КАРПОВА, В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Н.М. САМАРУК
МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦІЛІ ПО ФУР'Є-ОБРАЗУ ВІДБИТОГО СИГНАЛУ 111

С.М. КВАТЕРНЮК
АНАЛІЗ ПОХИБОК ЗАСОБУ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ 116

Є.С. ЛЄНКОВ
ЗАГАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СКЛАДНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБ’ЄКТУ 120

Г.Б. ЖИРОВ
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ’ЄКТІВ 124

Л.О. КОВТУН, Д.М. МЕДЗАТИЙ
ОСНОВНІ ІДЕЇ ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО СЛОВНИКОВОГО КОДУВАННЯ МЕТОДОМ ЛЕМПЕЛЯ-ЗІВА 129

Н. М. ЗАЩЕПКІНА, О. А. НАКОНЕЧНИЙ, Д. В. ЖИЛЯКОВ, М. І. ХАРЧЕНКО
УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В БЛИЖНІЙ ІНФРАЧЕРВОНІЙ ОБЛАСТІ СПЕКТРУ 137

О.В. БАРМАК, О.В. МАЗУРЕЦЬ, А.В. ЖИВІЛІК
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНОТУВАННЯ ТА РЕФЕРУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕКСТІВ 147

А.Я. КАРВАЦЬКИЙ, Г.М. ВАСИЛЬЧЕНКО, К.М. КОРОЛЕНКО, Т.В. ЧИРКА
ВІДНОВЛЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗВОРОТНОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ 159

Ю.П. КЛЬОЦ, О.В. ІВАНОВ, К.П. НЕГАНОВА
МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗІВ НА ОСНОВІ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОКАЗУ ЛІЧИЛЬНИКА НА ЗОБРАЖЕННІ 167

Д.А. МАКАРИШКІН, Н.М. САМАРУК
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАСИВНОГО ФІЛЬТРА НИЖНІХ ЧАСТОТ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЯРНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ 176

С.Д. ГАЛЮК, О.В. КРУЛІКОВСЬКИЙ, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ
АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ, ГЕНЕРОВАНИХ ХАОТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ТРАТАСА 187

Н.В. ТІТОВА, М.В. БАЧИНСЬКИЙ, Л.Г. КОВАЛЬ, О.С. КОЗОРІЗ
ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ І БАЗОВИХ РЕЖИМІВ ОПРОМІНЕННЯ ДЛЯ РИБОРОЗВОДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 193

О.Д. АЗАРОВ, А.В. СНІГУР, К.О. ГРИЦИШИНА
ОГЛЯД МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ СПРИЙНЯТТЯ ЛЮДИНОЮ ТЕКСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗОБРАЖЕННЯМИ НА ОСНОВІ ЗМІНЕННЯ ЇХ ЗОВНІШНЬОГО ВИГЛЯДУ 201

Д.М. МЕДЗАТИЙ, А.Б. КРИВЕНКО, С.С. НОЖЕНКО
WEB-СЕРВІС ПІДТРИМКИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРАКТИК СТУДЕНТІВ ІТ-СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ 210

А.Ю. ВОЛОВИК, О.В. ОСАДЧУК, О.П. ЧЕРВАК, М.А. ШУТИЛО
ОПТИМАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ПРИ ВИКОНАННІ КОМПЛЕКСНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ 214

Н.С. СВИРНЕВСКИЙ
РАЗРАБОТКА WEB-СИСТЕМЫ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ WEBGL ТЕХНОЛОГИИ 219

І.О. РОЗЛОМІЙ, Г.В. КОСЕНЮК
СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ ДОКУМЕНТІВ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙ МАТРИЧНОГО КРИПТОГРАФІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ 229

Г.І. БАРИЛО, Н.І. КУС, І.П. КРЕМЕР, В.В. ЛЕСІНСЬКИЙ, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ
СХЕМО-ТЕХНІЧНЕ РІШЕННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ОРГАНІЧНОГО ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА В СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ СТРУКТУРИ 234

Ю.Ф. ЗІНЬКОВСЬКИЙ, А.І. ВИТЯГАНЕЦЬ
СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МАГНІТОРЕЗИСТИВНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ 239

О.В. ГРЕСЬ, М.І. СКРИПСЬКИЙ, В.М. КОСОВАН., Г.М. РОЗОРІНОВ
ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ 243

С.В. ЯКУБОВСЬКА, Д.М. БАРАНОВСЬКИЙ
ПІДСИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЛІКАРЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКУ ІНФАРКТУ МІОКАРДА 252

К.Л. ГОРЯЩЕНКО, І.В. ГУЛА
ЗАКОНОДАВЧА БАЗА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРАЖАМИ 256

Р.О. БАГРІЙ
СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ СЛІВ ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ КОМУНІКАЦІЇ 263

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.01

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, М.И. СУББОТИНА
Одесская национальная академия пищевых технологий

К ИССЛЕДОВАНИЮ КИНЕМАТИКИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА

В работе предложен более простой метод исключения иррациональности функции положения центрального кривошипно-ползунного механизма, что позволяет также получить выражение аналогов скорости и ускорения, лишенные иррациональности. Метод основан на представлении знаменателя дроби в виде бесконечной дроби. Установлено, что независимо от точности приближения число слагаемых в выражениях кинематических показателей ползуна не меняется. Установлено также, что второе приближение дает хорошие результаты по точности, приемлемые для практики.

Ключевые слова: кривошип, механизм, ползун, шатун, функция положения, аналоги скорости и ускорения, бесконечная дробь.

R.V. AMBARCUMYANC, M.I. SUBBOTINA
Odessa National Academy of Food Technologies

CONCERNING THE RESEARCH OF KINEMATICS OF CENTRAL CRANK GEAR AND SLIDER MECHANISM

A more simple method of exclusion of irrationality of location function of central crank gear and slider mechanism has been offered in the paper and it also allows to obtain the expression of analogues of speed and acceleration, lacking in irrationality. The method is based on introducing of a denominator of a fraction as an endless fraction. It has been stated, that irrespective of approximation, the number of addends in the expressions of kinematic descriptions of a slider isn't changed. It has also been stated, that the second approximation gives good results concerning precision, acceptable for practise.

Keywords: crank gear, mechanism, slider, connecting rod, location function, analogues of speed and acceleration, endless fraction.

В различных отраслях техники и, особенно, в поршневых машинах широко распространен кривошипно-ползунный механизм. Кинематическое исследование этого механизма аналитическим методом является классическим показательным примером в учебниках по теории механизмов и машин [1, 2]. Требование получить функцию положения механизма от его обобщенной координаты в явном виде приводит к иррациональному выражению. Численная реализация такого уравнения сопровождается некоторыми затруднениями из-за его иррациональности. В работе [1] с целью исключения иррациональности функции положения центрального кривошипно-ползунного механизма предлагается подкоренное выражение разложить в ряд бинома Ньютона и после многочисленных преобразований получить выражение функции положения с определенным количеством слагаемых в зависимости от точности приближения расчетов. В первоначальных расчетных уравнениях перемещение ползуна (поршня) отсчитывается от центра вращения кривошипа. Чтобы получить ход поршня в зависимости от угла поворота кривошипа, что на практике часто требуется, предлагается ввести дополнительные изменения в ранее полученные уравнения.

Целью данной работы является получение функции положения центрального кривошипно-ползунного механизма в явном виде другим, более простым способом, позволяющим определить непосредственно значение хода поршня при текущем значении угла поворота кривошипа. Предлагаемый метод базируется на представлении знаменателя дроби в виде бесконечной дроби.

На рис. 1 представлена расчетная схема центрального кривошипно-ползунного механизма. Обозначим: φ и ψ – углы поворота кривошипа и шатуна *BC*. Принимаем начало отсчета хода ползуна от его правого крайнего положения.

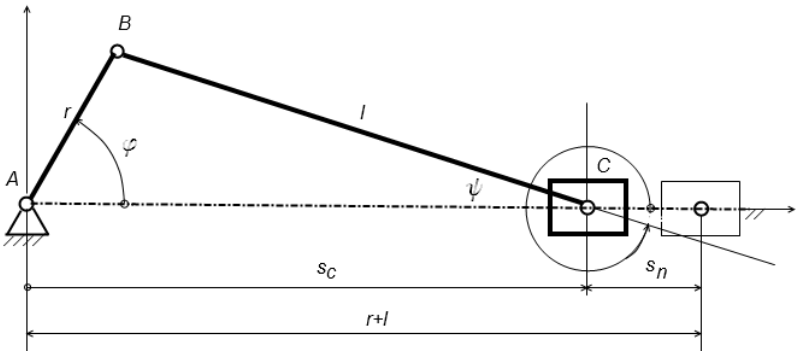


Рис. 1. Кинематическая схема центрального кривошипно-ползунного механизма

Совместим начало прямоугольной декартовой системы координат с центром шарнира *A* и направим ось *x* по направляющей ползуна. Текущая абсцисса центра шарнира *C* находится из выражения

$$s_C = r \cdot \cos\varphi + l \cdot \cos\psi\,, \tag{1}$$

где r, l – длина кривошипа и шатуна соответственно.

Ход поршня, согласно расчетной схеме, $s_{\ddot{i}} = (r + l) - s_C$ или с учетом (1)

$$s_{\ddot{i}} = r \cdot (1 - \cos\varphi) + l \cdot (1 - \cos\psi) = l \cdot [\lambda \cdot (1 - \cos\varphi) + 2 \cdot \sin^2(\psi / 2)]\,, \tag{2}$$

где $\lambda = r / l$ – относительная длина кривошипа.

Из расчетной схемы механизма очевидно, что $\sin\psi = \lambda \cdot \cos\varphi$. Тогда при использовании функции половинного угла получим соотношение

$$\sin(\psi / 2) = \lambda \cdot \sin\varphi / (2 \cdot \cos(\psi / 2))$$

или

$$\sin^2(\psi / 2) = \frac{\lambda^2 \cdot \sin^2\varphi}{4 \cdot \cos^2(\psi / 2)}\,. \tag{3}$$

Выражение (2) с учетом зависимости (3) принимает вид

$$s_{\ddot{i}} = r \cdot [(1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda \cdot \sin^2\varphi}{2 \cdot \cos^2(\psi / 2)}]\,. \tag{4}$$

В кривошипно-ползунных механизмах для улучшения условий передачи усилия от шатуна к ползуну рекомендуется значение отношения $\lambda \le 3$. При $\lambda = 3$ угол $\psi = \psi_{\max} = 19^\circ 28'$ достигается в положениях кривошипа 90° и 270°, то есть в двух положениях. В остальных положениях кривошипа угол $\psi < \psi_{\max}$. Если в расчетах не требуется слишком высокая точность нахождения значения хода поршня, то можно, принимая $\cos^2(\psi / 2) \approx 1$, ограничиться выражением

$$s_{\ddot{i}} = r \cdot [(1 - \cos\varphi) + (\lambda \cdot \sin^2\varphi) / 2]\,. \tag{5}$$

Если же требуется повысить точность приближения, то в выражении (4) функцию $\cos(\psi / 2)$ снова запишем через $\sin(\psi / 2)$ и из равенства (3) получим

$$s_{\ddot{i}} = r \cdot [(1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda \cdot \sin^2\varphi}{2 \cdot (1 - \frac{\lambda^2 \cdot \sin^2\varphi}{4 \cdot \cos^2(\psi / 2)})}]\,, \tag{6}$$

а при условии $\cos^2(\psi / 2) \approx 1$ имеем

$$s_{\ddot{i}} = r \cdot [(1 - \cos\varphi) + \frac{2 \cdot \lambda \cdot \sin^2\varphi}{4 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi}]\,. \tag{7}$$

Если точность приближения по выражению (7) недостаточная, то можно еще раз повторно осуществить замену в (6) функции $\cos(\psi / 2)$ с использованием (3) и учетом малости угла (ψ/2). Тогда функция положения механизма в третьем приближении представится в виде

$$s_{\ddot{i}} = r \cdot [(1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda \cdot \sin^2\varphi \cdot (4 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi)}{4 \cdot (2 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi)}]\,. \tag{8}$$

Аналог скорости выходного звена механизма в точном выражении [1]

$$s'_{\ddot{i}} = ds_{\ddot{i}} / d\varphi = r \cdot \sin\varphi + \frac{r^2 \cdot \sin 2\varphi}{2 \cdot \sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin^2\varphi}}\,. \tag{9}$$

В первом приближении аналог скорости определим из выражения (5). Имеем

$$s'_{\ddot{i}} = r \cdot [\sin\varphi + (\lambda / 2) \cdot \sin 2\varphi]\,, \tag{10}$$

которое совпадает с предлагаемым в учебнике [1].

Выполнив ряд преобразований, из уравнения (7) получим выражение для аналога скорости ползуна во втором приближении

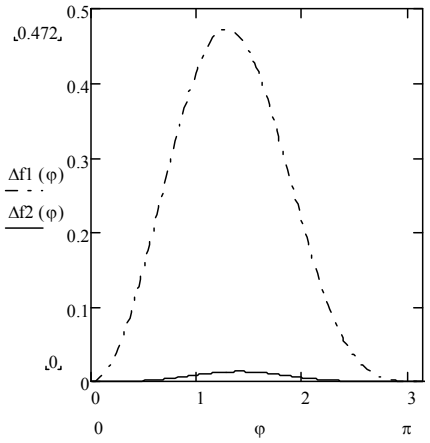
$$s'_{\ddot{i}} = r \cdot [\sin\varphi + \frac{8 \cdot \lambda \cdot \sin 2\varphi}{(4 - \lambda^2 \cdot \sin^2\varphi)^2}]\,. \tag{11}$$

Проведен сравнительный анализ точности вычислений функции положения и аналога скорости выходного звена при использовании представленного метода приближения. С этой целью выполнены расчеты перемещений, аналогов скоростей и ускорений выходного звена механизма в течение одного оборота кривошипа для значений отношения λ=1/3 и λ=1/5. При этом выполнялись расчеты для точных значений функций положения и аналога скорости поршня, для приближенных выражений функций в первом

и втором приближениях.

Результаты численных исследований для точных и приближенных выражений показали, что точность в первом приближении недостаточная. Выражения, полученные во втором приближении дают незначительное отклонение от точных результатов – в четвертом-пятом знаках после запятой – и являются вполне приемлемыми для инженерных расчетов.

На рис. 2 и 3 представлены графики относительных отклонений $\Delta f1(\varphi)$ и $\Delta f2(\varphi)$ функций положения ползуна при первом и втором приближениях соответственно и отклонений $\Delta v1(\varphi)$ и $\Delta v2(\varphi)$ аналогов скорости ползуна в первом и втором приближениях в процентах по отношению к точным значениям указанных функций. Графики построены для углов поворота кривошипа $0 \le \varphi \le 180^\circ$, так как положения звеньев механизма симметричны относительно направляющих ползуна.



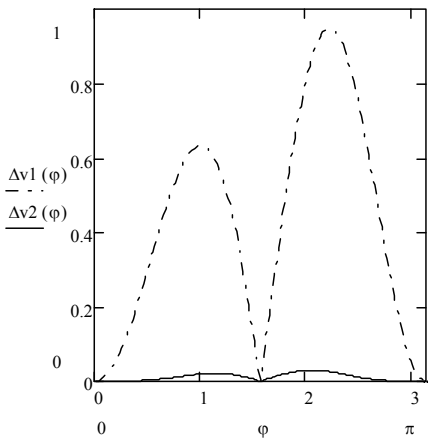


Рис. 2. Графики функций отклонений положения ползуна: $\Delta f1(\varphi)$ **- при первом приближении и** $\Delta f2(\varphi)$ **- при втором приближении**

Рис. 3. Графики функций отклонений аналога скорости ползуна: $\Delta v1(\varphi)$ **- при первом и** $\Delta v2(\varphi)$ **- при втором приближениях**

Как и следовало ожидать, максимальных отклонений функция положения ползуна достигает при углах поворота кривошипа $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$, поскольку именно в этих положениях угол поворота шатуна $\psi = \psi_{max}$. Относительное отклонение функций в первом приближении составляет 0,472%, во втором – 0,013%. Отклонения аналогов скоростей: 0,948% и 0,022% соответственно для первого и второго приближений.

Выводы

В приближенных выражениях функции положения отсутствует иррациональность. Выбранный метод приближения более простой, не требует сложных преобразований. Независимо от точности приближения число слагаемых в выражениях кинематических показателей ползуна не меняется. Установлено, что для грубых расчетов достаточно первое приближение. Для достижения высокой точности расчетов необходимо переходить ко второму и к третьему приближению. Как показывают расчеты, второе приближение дает вполне приемлемые результаты для практики.

Литература

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Наука, 1975. – 640 с.

2. Кожевников С. Н. Теория механизмов и машин / С. Н. Кожевников. – М. : Машиностроение, 1974. – 576 с.

References

1. Artobolevskyi Y. Y. Teoryia mekhanyzmov y mashyn / Y. Y. Artobolevskyi. – M. : Nauka, 1975. – 640 s.
2. Kozhevnykov S. N. Teoryia mekhanyzmov y mashyn / S. N. Kozhevnykov. – M. : Mashynostroenye, 1974. – 576 s.

Рецензія/Peer review : 15.06.2017р. Надрукована/Printed :3.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гладушняк А.К.

УДК 677.005: 621.333.6

В.С. НЕЙМАК, О.С. ПОЛІЩУК, Г.Ф. ВОРОНІН, Т.П. РОМАНЕЦЬ
Хмельницький національний університет

ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУБЧАСТО-ВАЖІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ПРИВОДУ ПАЗОВИХ ГОЛОК ОСНОВОВ'ЯЗАЛЬНИХ МАШИН ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТУ ПРАНС-ПК

Зубчасто-важільні механізми є одними із найбільш перспективних для створення сучасних машин та приладів. Проте не досліджено динаміку цих механізмів при кутових швидкостях, на яких працюють сучасні основов'язальні машини (понад 1500 об/хв). За таких кутових швидкостях наявність незрівноважених мас призводить до значних навантажень на вали та опори механізму. В статті представлено результати числових досліджень зубчасто-важільного планетарного механізму приводу пазових голок основов'язальних машин. Розроблено модель для визначення кінетичних та кінетостатичних характеристик запропонованого механізму. Для числових досліджень застосовано програмне середовище ПРАНС-ПК.

Ключові слова: зубчасто-важільний планетарний механізм, числові дослідження

V.S. NEYMAK, O.S. POLISCHUK, G.F. VORONIN, T.P. ROMANETS
Khmelnytskiy National University

NUMERICAL RESEARCH OF GEAR-LEVER OF THE PLANETARY DRIVE MECHANISMS OF BASIC NEEDLES OF WARP KNITTING MACHINES WITH THE USE OF THE SOFTWARE ENVIRONMENT PRANS-PK

Gear-lever mechanisms are among the most promising for the creation of modern machines and devices. But the dynamics of these mechanisms on frequency of circulation (over 1500 rotations per minute) in modern warp knitting machine hasn't been investigated yet. The availability of unbalanced masses on such frequencies of circulation leads to substantial loading on a shaft and a mechanism holder. The article presents the results of numerical research of gear-lever of the planetary drive mechanisms of basic needles of warp knitting machines A model is developed for determining the kinetic and kinetostatic characteristics of the proposed mechanism.. Software PRANS-PK is used for numerical research.

Keywords: gear-lever of the planetary mechanism, numerical research.

В лабораторії кафедри машин та апаратів Хмельницького національного університету було розроблено одно- та двоступеневий зубчасто-важільні планетарні механізми приводу робочих органів основов'язальних машин (ОВМ).

В роботах [1, 2] доведена можливість використання зубчасто-важільних механізмів в якості приводу основов'язальних машин на основі сателітних кривих, які здатні відтворювати дані механізми. Проте не досліджено динаміку цих механізмів при частотах обертання, на яких працюють сучасні основов'язальні машини – понад 1500 об/хв. При таких частотах обертання наявність незрівноважених мас призводить до значних динамічних навантажень на вали та опори механізму. Незрівноважені сили, змінні за величиною та напрямом, можуть викликати вібрацію як окремих ланок так і всього механізму в цілому, причому найбільші вібрації викликаються силами інерції обертових мас та мас, що рухаються зворотно-поступально. В роботі [3] було проаналізовано можливі варіанти зрівноваження та проведено ряд заходів для цього.

Наступним етапом є дослідження динамічних навантажень зубчасто-важільних планетарних механізмів, зокрема визначення реакцій в опорах, що виникають під час руху. Визначення та аналіз динамічних характеристик зубчасто-важільних планетарних механізмів дасть можливість порівняти їх із іншими механізмами, що використовуються в якості приводів ОВМ, розробити та перевірити методи для зменшення динамічних навантажень.

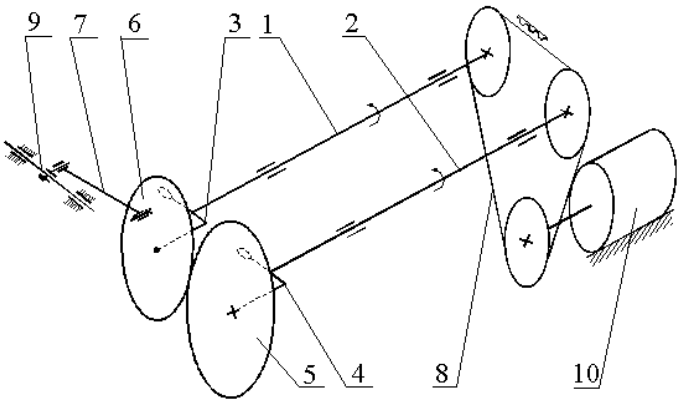


Рис. 1. Зубчасто-важільний планетарний механізм

Схема одноступеневого зубчасто-важільного планетарного механізму приведена на рис. 1. На рисунку позначено: 1, 2 – вали, 3, 4 – кривошипи, 5 – центральне колесо, 6 – сателіт, 7 – шатун, 8 – зубчастопасова передача, 9 – повзун, 10 – двигун.

В області автоматизації проектування приводів і динамічних систем, які складаються з електронних систем управління, електрогідравлічних та гідравлічних підсилювачів, електричних, гідравлічних або пневматичних двигунів, механічних передач і механізмів, трансмісій широко використовується система ПРАНС-ПК, що розроблена в Національному технічному університеті України «Київському політехнічному інституті України імені Ігоря Сікорського». Переваги системи в порівняні з вітчизняними та закордонними аналогами – можливість автоматизованого виконання всього комплексу робіт схемотехнічного етапу

проектування динамічних систем з різними за фізичним складом елементами.

Відома методика кінематичного аналізу за допомогою ЦЕОМ, яка полягає в визначенні положень всіх шарнірів в залежності від руху ведучих ланок [4]. Розрахунок ведеться за допомогою геометричних залежностей, оригінальних для кожного механізму. При цьому виникають неоднозначності, які пов'язані з визначенням знаку перед квадратним коренем, номера квадранта кута та ін. Такі неоднозначності значно ускладнюють складання алгоритму рішення. Фактично, для кожного механізму необхідно складати трудомістку програму.

На такому ж принципі заснована методика динамічного та кінематичного аналізу деяких площинних механізмів, яка застосовується розробниками пакета "ПРАНС-ПК" [5]. Декілька найпростіших механізмів розглянуті як передаючі дві узагальнені змінні: швидкісну та силову (швидкість і сила, кутова швидкість і момент). Пов'язують ці змінні ті ж самі геометричні залежності. Динамічний вплив проміжних ланок механізму пропонується враховувати приведенням їх мас до вхідних та вихідних ланок, що знижує точність аналізу. Крім того, при використанні цієї методики неможливо оцінити внутрішні динамічні параметри механізму, наприклад, зусилля у шарнірах, відносні швидкості обертання ланок, які важливо враховувати, особливо при аналізі високошвидкісних механізмів [4].

Відома методика аналізу, яка базується на описанні шарнірно-важільної ланки як твердого тіла з масою m та моментом інерції J [5].

Положення шарнірів задаються векторами від центра мас ланки. Приклад моделі ланки площинного механізму наведено на рис.2.

Позначено: ЦМ – центр мас, 1,2 – шарніри, $\overline{L_i}$ – вектор положення i-го шарніру відносно центру мас, $\overline{F_i}$ – вектор зусилля від i-го шарніру, $\overline{V_i}$ – вектор швидкості i-го шарніру, ω – кутова швидкість обертання, M – рушійний момент.

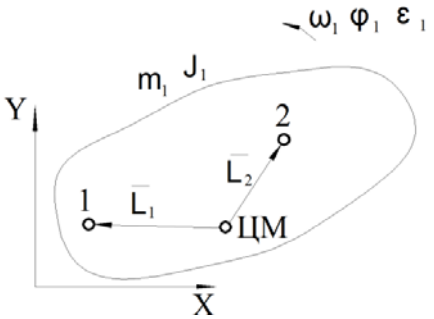


Рис. 2. Фізична модель двошарнірної ланки

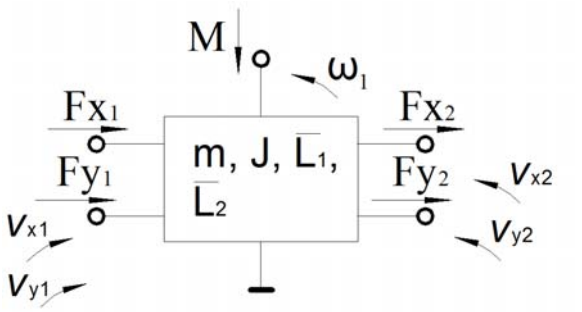


Рис. 3. Електрична модель двошарнірної ланки

Рух ланки як твердого тіла під дією сил у шарнірах та моменту описується рівняннями руху центру мас після приведення усіх сил в цей центр та оберту ланки навколо центру мас:

$$\sum_{i=1}^{i=3} F_{iX} = m \cdot \frac{dV_{X...M}}{dt},$$
$$\sum_{i=1}^{i=3} F_{iY} = m \cdot \frac{dV_{Y...M}}{dt}, \qquad (1)$$
$$\sum_{i=1}^{i=3} M_{Fi...M} + M = J \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Пакет прикладних програм "ПРАНС-ПК" дозволяє скласти універсальну модель такого тіла, яка вимагає для конкретизації тільки довжини L векторів шарнірів та початкові значення кутів α між ними і осями координат, масу та момент інерції ланки. Схема заміщення моделі наведена на рис. 3.

Запропоновано методику, що базується на моделюванні руху ланок механізму як окремих твердих тіл у площині осей $X-Y$ у часі під дією реакцій у шарнірах. Кожна ланка представляється в моделі механізму за допомогою типової електричної моделі. З'єднанням ланок шарнірами відповідає електричне з'єднання типових моделей ланок відповідними електричними виводами (полюсами). Особливий полюс, який моделює стояк як ланку механізму, називається базою і його електричний потенціал дорівнює нулю. Потенціал кожного з полюсів ланок відносно бази дорівнює швидкості руху відповідного шарніра відносно стояка вздовж вісі X або вісі Y. Електричний струм між з'єднаними полюсами двох ланок відповідає силі взаємодії цих ланок вздовж тих самих осей. Пропонуються деякі особливості застосування таких електричних моделей ланок як складових плоского механізму.

Розрахунок моделі на ЕОМ базується на законах Кірхгофа, в яких суми струмів до вузла та суми падінь напруги вздовж замкнутого електричного ланцюга дорівнюють нулю. В методиці модель ланки містить залежні джерела напруги в ланцюгах руху вздовж осей $X-Y$ та залежні джерела струму в ланцюгах обертового руху. Залежність джерел позначає постійний розрахунок величин цих джерел за

певними строгими і вірними формулами. Замикання електричних ланцюгів як моделей ланок з т.з. академічної науки повністю відповідає замиканню контуру механізму окремими ланками. Однак, за рахунок неточностей розрахунків залежних джерел закони Кірхгофа виконуються з певною точністю і рівність нулю сум змінних не досягається.

З таких міркувань пропонується при замиканні моделей ланок в єдиний електричний ланцюг робити хоча б одне з'єднання через залежне джерело струму (не напруги), напруга на якому дасть можливість отримати нульову суму напруг та струмів. Для жорсткості такого з'єднання з т.з. механіки, таке джерело струму (сили) можна задати як силу пружно-пластичного контакту двох металевих поверхонь. Ця сила діє на дві поверхні значною силою при різниці швидкостей та положень обох поверхонь. Для такого моделювання в ППП „ПРАНС-ПК" присутні спеціальні елементи, що і відображаються відповідними джерелами струму.

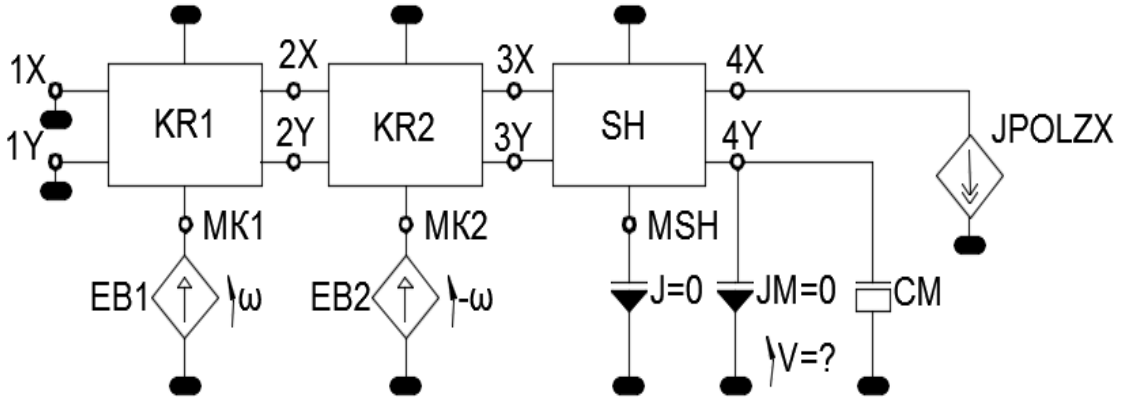


Рис. 4. Схема заміщення зубчасто-важільного планетарного механізму приводу пазових голок основов'язальних машин

Позначено: EB1 – джерело кутової швидкості кривошипа KR1; MK1 – вузол, напруга на якому дорівнює кутовій швидкості обертання кривошипу KR1; 1X, 1Y – вузли швидкостей опори кривошипа KR1 вздовж осей X та Y (напруга на них дорівнює 0); KR1 – модель ланки кривошипа KR1; 2X, 2Y – вузли швидкостей руху шарніра 2; KR2 – модель ланки кривошипа KR2; EB1 – джерело кутової швидкості кривошипа KR2 (направлена в протилежну сторону швидкості EB1); 3X, 3Y – вузли швидкостей руху шарніра 3; SH – модель ланки шатуна SH; MSH – вузол, напруга на якому дорівнює кутовій швидкості обертання шатуна MSH; 4X, J = 0 – вимірювач кутової швидкості шатуна SH; 4Y – вузли швидкостей руху шарніра 4; J – обмежувач руху повзуна вздовж горизонталі; JM – вимірювач швидкості повзуна; CM – маса повзуна; JM та CM є елементами інтегратора знаходження переміщення повзуна.

З'єднуючи такі моделі, тобто вказуючи які шарніри яких ланок зв'язані один з другим відповідними полюсами, отримуємо можливість побудови моделі механізму будь-якої складності.

Використовувалась спрощена двошарнірна модель. Описання механізму відображається трьома рядками:

КРИВОШИП1 (список об'єднаних полюсів) = СП1.ДВШЛАНКА;

КРИВОШИП2 (список об'єднаних полюсів) = СП2.ДВШЛАНКА;

ШАТУН (список об'єднаних полюсів) = СП3.ДВШЛАНКА.

Параметри ланок завдаються у вигляді: параметр = значення.

Випробувальний розрахунок було проведено для зубчасто-важільного механізму з такими параметрами:

маси кривошипа 1 – 770 г, кривошипа 2 – 24,8 г, шатуна – 37,6 г, повзуна 23,3 г;

моменти інерції кривошипа 1 – 0,43 г·м^2, кривошипа 2 – 0,0035 г·м^2, шатуна – 0,012 г·м^2;

довжини ланок кривошипа 1 – 10 мм, кривошипа 2 – 5 мм, шатуна – 40,8 мм;

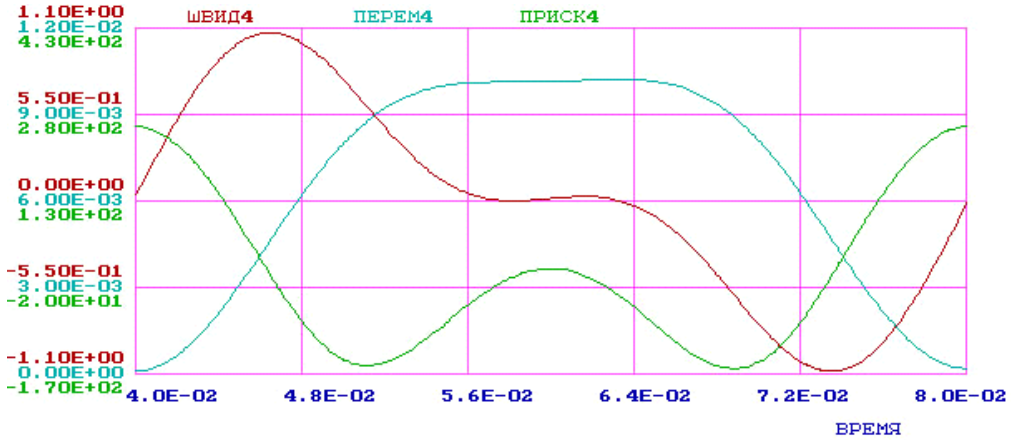
розміщення ланок: кривошип 1 – вертикально вверх, кривошип 2 – горизонтально, повзун – вертикально;

швидкість обертання кривошипа – 1500 об/хв.

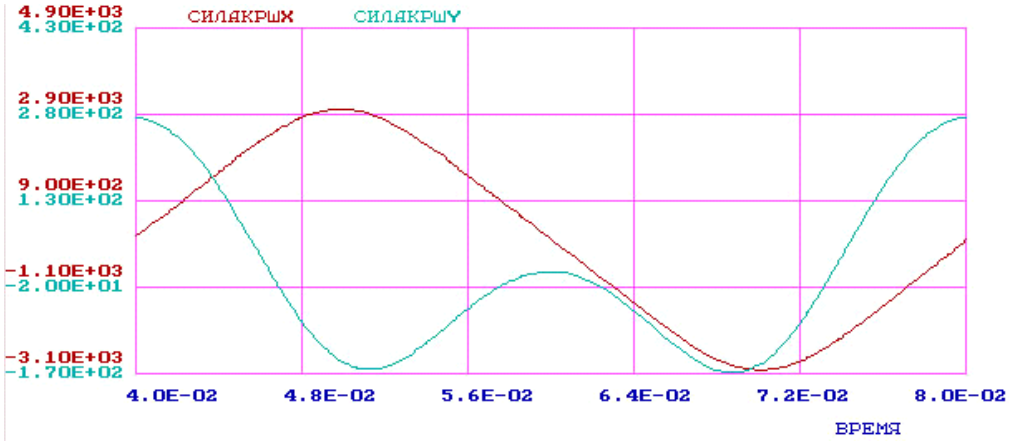
Висновки

Аналіз механізму за допомогою пакета "ПРАНС-ПК" дозволив визначити всі кінематичні та динамічні параметри: абсолютні та відносні швидкості, кути поворотів, прискорення, реакції в шарнірах від дії інерційних сил руху ланок, які сягали значень близько 5500 Н, момент на кривошипі, інерційні моменти ланок.

Таким чином, провівши чисельні дослідження у ППП „ПРАНС-ПК" отримано графічні залежності кінематичних та кінетостатичних параметрів зубчасто-важільного планетарного механізму приводу пазових голок основов'язальних машин. Наступним етапом досліджень є введення у систему сили дії корисного опору(технологічного навантаження) та порівняння параметрів даного механізму із існуючими механізмами приводу пазових голок основов'язальних машин.



ПЕРЕМ4 – переміщення повзуна, м, ШВИД4 – швидкість повзуна, м/с, ПРИСК4 – прискорення повзуна, м/с^2
Рис. 5. Результати кінематичних досліджень зубчасто-важільного планетарного механізму приводу пазових голок основов'язальних машин



СИЛАКРШХ – сила взаємодії кривошипа з опорою вздовж вісі X, Н,
СИЛАКРШY – сила взаємодії кривошипа з опорою вздовж вісі Y, Н
Рис. 6. Результати кінетостатичних досліджень зубчасто-важільного планетарного механізму приводу пазових голок основов'язальних машин

Література

1. Карелин В.С. Проектирование рычажных и зубчато-рычажных механизмов / В.С. Карелин. – М. : Машиностроение, 1986. – 184 с.

2. Смутко С.В. Розробка універсальних зубчасто-важільних планетарних механізмів приводу петлетвірних органів основов'язальних машин : дис. … кандидата технічних наук : 05.05.10 / Смутко Світлана Валеріївна. – Хмельницький, 2001. – 206 с.

3. Неймак В.С. Зрівноваження одноступеневого зубчато-важільного планетарного механізму / В.С. Неймак, Г.Б. Параска // Вісник Хмельницького національного університету. – 2004. – № 5. – С. 60–63.

4. Чкалов В.В. Автоматизация схемотехнического проектирования в машиностроении / В.В. Чкалов, А.И. Петренко, В.В. Ладогубец. – К. : УМК ВО, 1988. – 180 с.

5. Воронін Г.В. Розробка методики кінематичного та динамічного аналізу шарнірно-важільних механізмів за допомогою цифрових електронно-обчислювальних машин / Г.Ф. Воронін // Вісник Технологічного університету Поділля. – 1998. – № 4. Ч. 2. – С. 86–88.

References

1. Karelyn V.S. Proektyrovanye rychazhnыkh y zubchato-rychazhnykh mekhanyzmov / V.S. Karelyn. – M. : Mashynostroenye, 1986. – 184 s.

2. Smutko S.V. Rozrobka universalnykh zubchasto-vazhilnykh planetarnykh mekhanizmiv pryvodu petletvirnykh orhaniv osnovoviazalnykh mashyn : dys. … kandydata tekhnichnykh nauk : 05.05.10 / Smutko Svitlana Valeriivna. – Khmelnytskyi, 2001. – 206 s.

3. Neimak V.S. Zrivnovazhennia odnostupenevoho zubchato-vazhilnoho planetarnoho mekhanizmu / V.S. Neimak, H.B. Paraska // Herald of Khmelnytsky National University. – 2004. – # 5. – S. 60–63.

4. Chkalov V.V. Avtomatyzatsyia skhemotekhnycheskoho proektyrovanyia v mashynostroenyy / V.V. Chkalov, A.Y. Petrenko, V.V. Ladohubets. – K. : UMK VO, 1988. – 180 s.

5. Voronin H.V. Rozrobka metodyky kinematychnoho ta dynamichnoho analizu sharnirno-vazhilnykh mekhanizmiv za dopomohoiu tsyfrovykh elektronno-obchysliuvalnykh mashyn / H.F. Voronin // Visnyk Tekhnolohichnoho universytetu Podillia. – 1998. – # 4. Ch. 2. – S. 86–88.

Рецензія/Peer review : 2.7.2017 р. Надрукована/Printed :8.9.2017 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Карматіта А.К.

УДК 629.114.4-047.58:004.9

О.М. ПИЛИПЕНКО, О.В. БАТРАЧЕНКО
Черкаський державний технологічний університет
І.М. ЛИТОВЧЕНКО
Національний університет харчових технологій

ОБҐРУНТУВАННЯ НОВОГО СПОСОБУ ЗМЕНШЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ СІДЕЛЬНИХ АВТОПОТЯГІВ

Запропоновано новий спосіб зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів – застосування у складі напівпричепа аеродинамічних тунелів, крізь які відбувається перетікання повітряних потоків, що набігають на лобову частину напівпричепу та обтікають напівпричеп з боків. Шляхом чисельного моделювання встановлено особливості розподілення зон турбулентної дисипації повітряного потоку та його швидкості в зоні розрідження позаду напівпричепа.

Ключові слова: сідельний автопотяг, зменшення аеродинамічного опору, новий спосіб, чисельне моделювання.

OLEXANDR MIKHAILOVICH PILIPENKO, OLEXANDR VICTOROVICH BATRACHENKO
Cherkassy state technological University
IGOR MIKOLAEVYCH LITOVCHENKO
National University of food technologies

JUSTIFICATION FOR THE NEW WAY REDUCING THE AERODYNAMIC DRAG OF SEMI-TRUCKS

A new way to reduce aerodynamic drag truck Heavy and long vehicles - use in the semi wind tunnels, through which there is flow of air currents that run on the frontal part of the semi-trailer and the semi flow around the sides. It is shown that during transport the majority of types of cargo, semitrailers is Incomplete volume even when fully loaded weight. This creates the possibility of placing wind tunnels in the upper and lower lateral parts of trailers. Through numerical simulation of the peculiarities of the distribution areas of turbulent air flow and dissipation of its speed in the area behind the semi dilution. The results prove promising application of the proposed method for reducing the aerodynamic drag truck Heavy and long vehicles.

Keywords: truck, semi-trailer, aerodynamics, simulation.

Постановка проблеми

Ефективним шляхом підвищення паливної економічності сідельних автопотягів є зменшення їх аеродинамічного опору [1, 2]. Найбільшу частку (30–35%) аеродинамічного опору автопотягу складає зона розрідження (ЗР) позаду напівпричепа, дещо меншу (близько 20%) – лобовий опір кабіни та напівпричепа [1, 2]. На теперішній час відомо такі шляхи зменшення шкідливого впливу ЗР позаду напівпричепа, як застосування задніх спойлерів, які встановлюються позаду напівпричепу, та використання напівпричепів обтічної (каплеподібної) форми.

Задні спойлери виготовляються такими виробниками, як «TrailerTail», «Aerovolution», «STEMCO Aerodynamics», Mercedes-Benz Aerodynamics Trucks «Aero trailer» тощо. Але вони володіють низькою ефективністю і їх застосування в країнах Європейського союзу є неможливим через діючі стандарти, які жорстко обмежують довжину автопотягу. Відомі напівпричепи обтічної форми «Teardrop» фірми «Don-Bur» та «Krone AeroLiner» фірми «MAN Truck & Bus». Однак суттєвого зменшення аеродинамічного опору можна досягти лише при яскраво вираженій обтічній формі напівпричепа, що призводить до неможливості перевезення габаритних вантажів, зменшення використовуваного корисного об'єму та неможливості завантаження і розвантаження автонавантажувачем з боку дверей, що є необхідним при роботі з рампи.

Актуальним є розробка нового способу зменшення аеродинамічного опору автопотягів, який би володів підвищеною ефективністю та був позбавлений при цьому зазначених вище недоліків.

Аналіз останніх джерел

В роботах [1, 2] наведені узагальнені числові дані впливу окремих чинників на загальний аеродинамічний опір автопотягу. Автори [3–5] представили результати моделювання аеродинаміки автопотягу стандартної будови. Авторами роботи [6, 7] було досліджено ефективність застосування задніх спойлерів.

У відомих роботах не запропоновано нових шляхів зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів за рахунок зменшення ЗР позаду напівпричепа та відсутні результати відповідних досліджень. Актуальним є вирішення даної задачі.

Метою статті є розробка нового способу зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів, обґрунтування технічної можливості його реалізації та дослідження ефективності його застосування шляхом чисельного моделювання аеродинаміки автопотягу.

Виклад основного матеріалу

Як зазначалось вище, суттєво зменшити аеродинамічний опір автопотягу можна усунувши або значно зменшивши ЗР позаду напівпричепа. Аналізуючи існуючі способи вирішення цієї задачі, можна визначити наступне. У випадку коли фургон напівпричепу має звичайну форму паралелепіпеда, тоді є можливість перевезення великогабаритних вантажів та завантаження-розвантаження напівпричепа електронавантажувачем з рампи через задні двері напівпричепа. Але такому напівпричепу властивий

великий аеродинамічний опір через значну ЗР позаду напівпричепа. У випадку коли фургон напівпричепу має яскраво виражено обтічну (каплеподібну) форму у вертикальній та у горизонтальній площині, тоді його аеродинамічний опір є мінімальним серед існуючих напівпричепів. Але в такому випадку немає можливості перевезення великогабаритних вантажів, завантаження-розвантаження напівпричепа електронавантажувачем з рампи через задні двері та суттєво збільшується довжина автопотягу.

Отже, можна сформулювати наступне технічне протиріччя: фургон повинен мати форму паралелепіпеда для перевезення великогабаритних вантажів та покращення зручності навантажувальних робіт і фургон повинен мати каплеподібну форму задля мінімізації його аеродинамічного опору.

Для вирішення даного технічного протиріччя авторами був застосований наступний інструментарій теорії технічних систем – поняття ідеального кінцевого результату, функціонально-вартісний аналіз та типові прийоми (принципи) вирішення технічних протиріч (принципи дроблення, місцевої якості, асиметрії, «матрьошки», часткового або надлишкового рішення, обернути шкоду на користь, використання гнучких оболонок і тонких плівок).

Відомі технічні рішення, спрямовані на зменшення ЗР, так чи інакше передбачають створення плавної зміни форми напівпричепа в задній його частині з метою зменшення відриву потоку повітря та зменшення утвореної зони турбулентності. Тобто вони передбачають «боротьбу» із завихреннями позаду напівпричепа в той чи інший спосіб. Але фізична природа завихрень повітряного потоку така, що усунути їх без використання каплеподібної форми фургону або задніх спойлерів значної довжини на даний час не можливо. Значно ефективнішим є недопущення утворення цих завихрень тим чи іншим способом.

Ідеальним кінцевим результатом було б проходження повітря крізь автопотяг задля усунення огинання повітряним потоком корпусу автопотяга і попередження таким чином утворення завихрень.

Шляхом застосування функціонально-вартісного аналізу було встановлено, що в будові автопотягу є резерв простору крізь який може бути організовано проходження набігаючого потоку повітря, а саме крізь верхню та бокові частини напівпричепу, а також крізь верхній спойлер кабіни тягача. Таку можливість підтверджує практика вантажних перевезень – не при кожному вантажному перевезенні перевозиться вантаж такого виду і в такій кількості, щоб об'єм напівпричепу був заповнений повністю.

Авторами пропонується (рис. 1) новий спосіб зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів пропускати потік повітря, який набігає на лобову частину автопотягу, крізь аеродинамічні тунелі, що розташовані у верхній та у задній нижній частинах напівпричепу [8]. Аеродинамічні тунелі (рис. 2) при цьому виконуються гнучкими з можливістю згортання та розгортання – вони розкладаються в робоче положення при наявності вільного об'єму в напівпричепі задля зменшення його аеродинамічного опору і складаються в неробоче положення при перевезенні великогабаритних вантажів. Більш детально конструкція аеродинамічних тунелів наведена у [9].

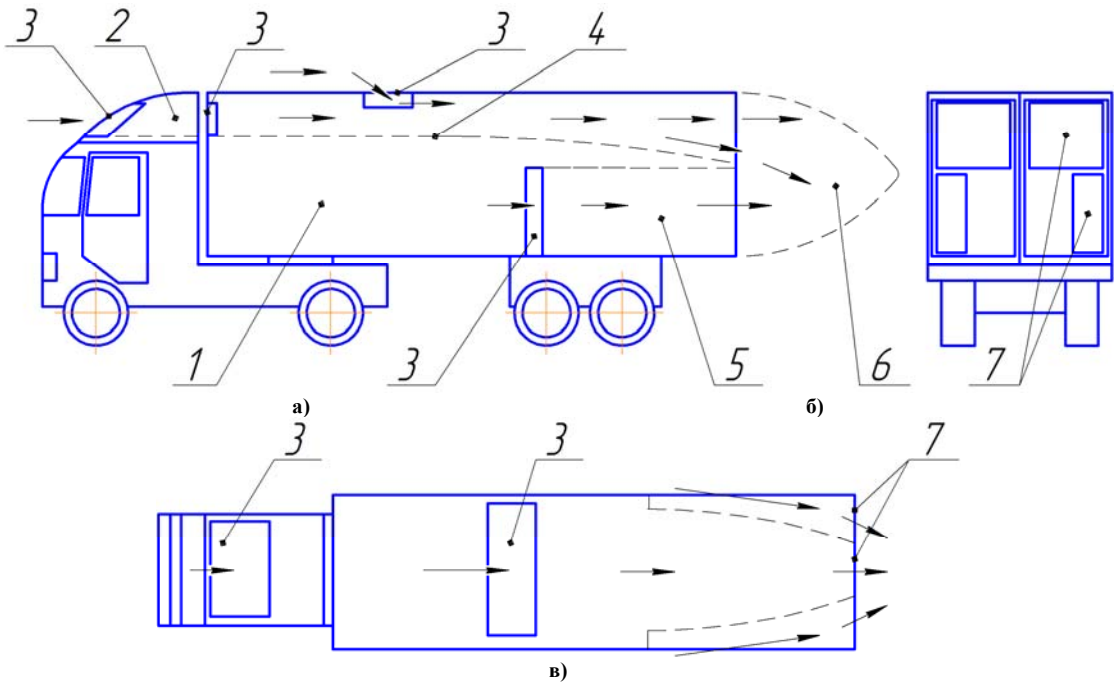


Рис. 1. Принципова схема реалізації розробленого способу зменшення аеродинамічного опору сідельного автопотягу: а) вид автопотягу збоку; б) вид автопотягу ззаду; в) вид автопотягу зверху; 1) напівпричіп; 2) передній спойлер; 3) люки; 4) верхній аеродинамічний тунель; 5) бокові аеродинамічні тунелі; 6) зона розрідження позаду напівпричепа; 7) вихідні вікна

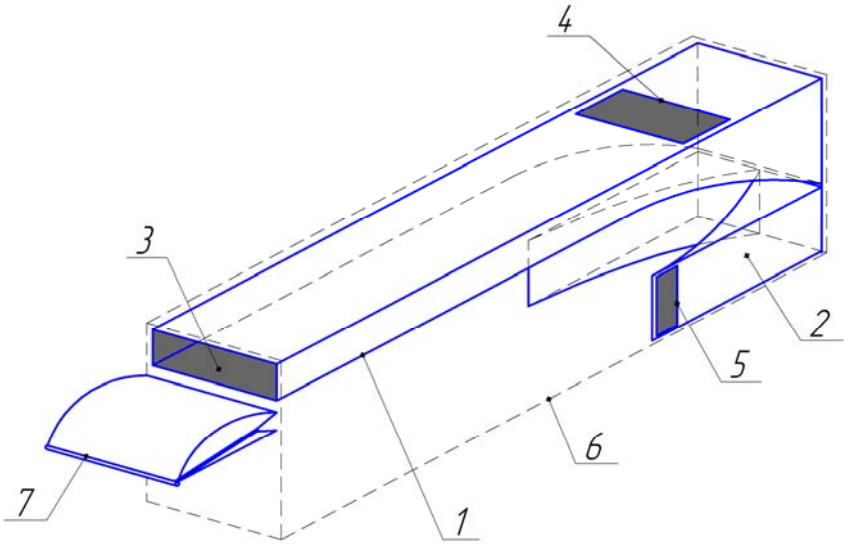


Рис. 2. Схема розташування аеродинамічних тунелів в напівпричепі:
1) верхній аеродинамічний тунель; 2) бокові аеродинамічні тунелі;
3) передній повітрозабірний люк; 4) верхній повітрозабірний люк; 5) бокові повітрозабірні люки;
6) вантажна зона автомобілю; 7) передній спойлер

Запропонований спосіб дозволяє істотно зменшити загальний аеродинамічний опір автопотягу за рахунок одночасного зменшення ЗР позаду напівпричепа та зменшення лобового опору тягача та напівпричепа (два негативні чинники взаємно нейтралізуються). При цьому, на відміну від аналогів, зберігається незмінною довжина автопотягу, можливість перевезення великогабаритних вантажів та виконання навантажувальних робіт механізованим способом з рампи.

В таблиці 1 наведено розраховані значення величини вільного об'єму та вільної висоти напівпричепу при перевезенні вантажів різного типу. Прийнято наступні технічні характеристики напівпричепа: вантажопідйомність – 22 т; загальний об'єм – 82 / 87 м^3; довжина – 13,6 м; ширина – 2,45 м; висота – 2,45 / 2,6 м; площа підлоги – 33,32 м^2. Об'ємна вага вантажів прийнята відповідно до [10].

Таблиця 1

Вільна висота у напівпричепі при умові його повного завантаження по масі

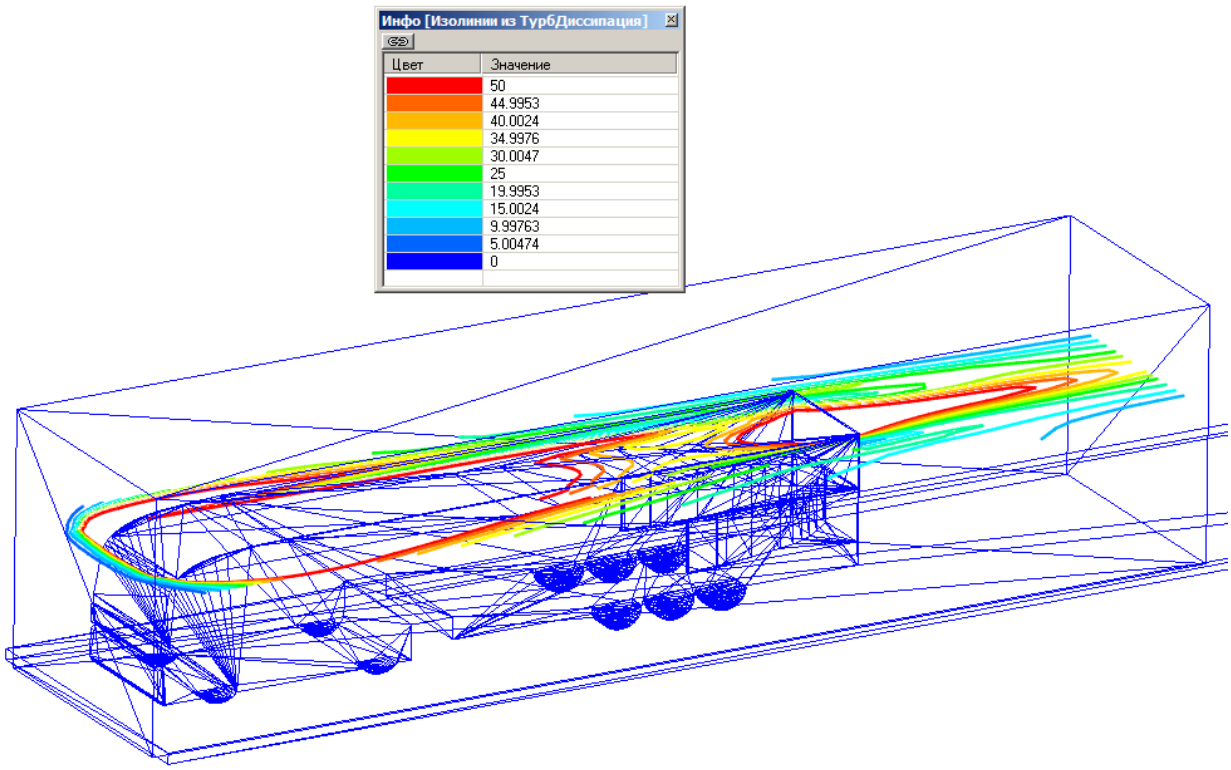
№	Вид вантажу	Об'ємна вага вантажу, т/м^3	Об'єм вантажу, що відповідає 22 т, м^3	Вільний об'єм напівпричепу, м^3		Вільна висота у напівпричепі, м	
				для 82 м^3	для 87 м^3	для 82 м^3	для 87 м^3
1	Одяг	0,12	183	-	-	-	-
2	Тютюн	0,28	78,5	3,5	8,5	0,1	0,25
3	Чай	0,32	68,75	13,25	18,25	0,4	0,55
4	Кондитерські вироби	0,45	49	33	38	0,99	1,14
Вантажі, при яких вільною є понад 50% висоти напівпричепу							
5	Горілчані вироби	0,5	44	38	43	1,14	1,29
6	Папір / парфумерія	0,52	42,3	39,7	44,7	1,19	1,34
7	Мийні засоби / азбестові вироби	0,7	31,4	50,6	55,6	1,52	1,67
8	Крупа, макарони	0,75	29,3	52,7	57,7	1,58	1,73
9	Цукор	0,77	28,5	53,5	58,5	1,61	1,76
10	Метизи	2,5	8,8	73,2	78,2	2,2	2,35

Як видно з таблиці 1, при транспортуванні більшості видів вантажів навіть при повністю заповненому напівпричепі за масою (що відбувається не в усіх випадках транспортування вантажів) наявний значний вільний простір у верхній частині напівпричепу. Це доводить принципову можливість реалізації розробленого способу зменшення аеродинамічного опору сідельного автопотягу.

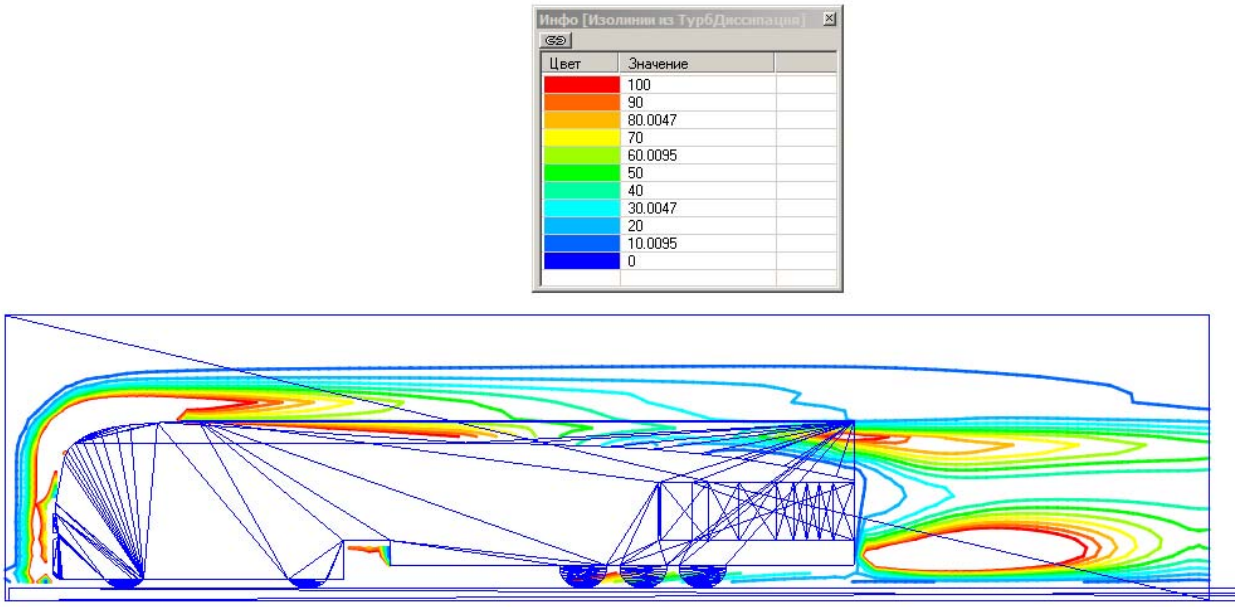
Дослідження ефективності застосування розробленого способу проводилось шляхом чисельного моделювання аеродинаміки автопотягу із використанням програмного комплексу FlowVision. Базовими в математичній моделі були рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності потоку, рівняння турбулентної в'язкості. Крім того, в модель входять рівняння для турбулентної енергії і швидкості дисипації турбулентної енергії. В даній роботі в ході моделювання була використана k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами густини при великих змінах числа Рейнольдса. У розрахунку були використані наступні параметри: густина повітря 1,2 кг/м^3; температура t=20 ºС; швидкість набігаючого повітря 25 м/с

(даний режим відповідає руху автопотягу зі швидкістю 90 км/год). При визначенні граничної умови стінки була задана шорсткість поверхні, яка характерна для матеріалу, з якого виготовляються автопотяги. В ході досліджень використана 3D-модель автопотягу марки «IVECO New Stralis XP» довжиною 17 м із одним верхнім та двома боковими аеродинамічними тунелями розробленої будови.

Результати моделювання представлені на рис. 3, 4. Як слідує з отриманих результатів, застосування аеродинамічних тунелів призводить до суттєвого зменшення турбулентної дисипації повітряного потоку. у верхній частині зони розрідження позаду напівпричепу зони максимальна дисипація складає 100 одиниць, тоді як для стандартного автопотягу [5] вона сягає 200 одиниць, а для автопотягу із задніми спойлерами [7] – від 120 до 185 одиниць. При цьому для випадку аеродинамічних тунелів розмір зон з максимальною дисипацією менший від 1,2 разу до 24 разів. В нижній частині зони розрідження, в центральному повздовжньому перерізі, спостерігається підвищена дисипація (рис. 3, б), оскільки в даній частині відсутній аеродинамічний тунель, бокові аеродинамічні тунелі розміщені з боків напівпричепу.



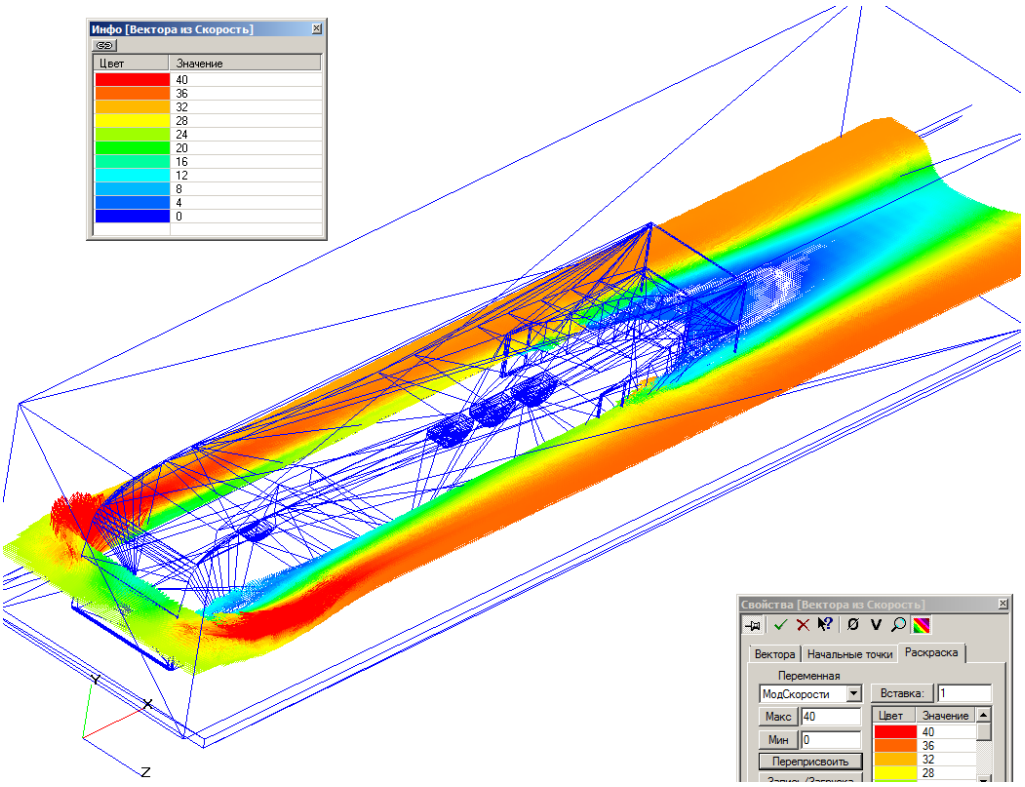
а)



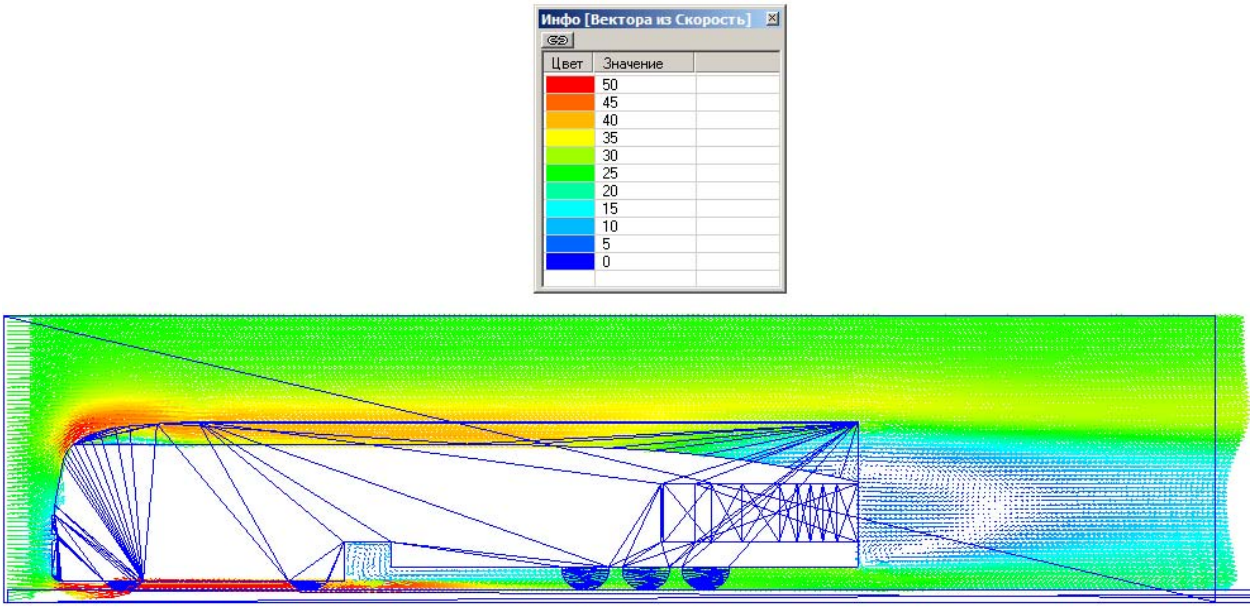
б)

Рис. 3. Розподілення турбулентної дисипації повітряного потоку при обтіканні автопотягу, м/с (у вигляді ізоліній): а) в горизонтальному повздовжньому перерізі; б) у вертикальному центральному повздовжньому перерізі

Позаду бокових аеродинамічних тунелів спостерігається аналогічне верхньому тунелю зменшення турбулентної дисипації, яке, однак менше за верхній тунель внаслідок меншої площі отвору для входу повітря в боковий тунель в порівнянні з верхнім тунелем.



а)



б)

Рис. 4. Розподілення швидкості повітряного потоку при обтіканні автопотягу, м/с (у вигляді векторів): а) в горизонтальному повздовжньому перерізі; б) у вертикальному центральному повздовжньому перерізі

Швидкість повітряного потоку позаду напівпричепу також істотно відрізняється від швидкості при обтіканні стандартного автопотягу. Її значення сягає 15 м/с у верхній частині зони розрідження, тоді як для стандартного автопотягу [5] ці значення складають 4,5 м/с, що вказує на значно менше розрідження позаду напівпричепу з аеродинамічними тунелями в порівнянні зі стандартним автопотягом. Значення швидкості повітряного потоку в даній зоні відповідають швидкості повітря при використанні заднього спойлеру довжиною 5,5 м [7]. Отримані дані вказують на ефективність застосування аеродинамічних тунелів у складі автопотягів.

Висновки

Запропоновано новий спосіб зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів –

застосування у складі напівпричепа аеродинамічних тунелів, крізь які відбувається перетікання повітряних потоків, які набігають на лобову частину напівпричепу та обтікають напівпричеп з боків. Показано, що при перевезенні переважної частини видів вантажів, напівпричеп є недозавантаженим за об'ємом (насамперед, по висоті) навіть при повному завантаженні за вагою. Це створює можливість розміщення аеродинамічних тунелів у верхній та у нижніх бокових частинах напівпричепу.

Шляхом чисельного моделювання встановлено особливості розподілення зон турбулентної дисипації повітряного потоку та його швидкості в зоні розрідження позаду напівпричепа. Отримані результати доводять перспективність застосування запропонованого способу для зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів. На розроблені рішення подано 2 заявки на винахід.

Література

1. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля / А. Н. Евграфов. – М. : МГИУ, 2010. – 356 с.

2. Belzile Marc. Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses. Technical Report [Електронний ресурс] / Marc Belzile. – Канада, 2012. – Режим доступу : www.tc.gc.ca.

3. Pevitt C. A Computational Simulation of Aerodynamic Drag Reductions for Heavy Commercial Vehicles / C. Pevitt, H. Chowdury, H. Moriaand, F. Alam // 18th Australasian Fluid Mechanics Conference. – Launceston, Australia. – 3–7 December 2012. – P. 54–84.

4. Rose McCallen. DOE'sEffort to Reduce Truck Aerodynamic Drag through Joint Experiments and Computations [Електронний ресурс] / Rose McCallen et al. – США, 2006. – Режим доступу : www1.eere.energy.gov.

5. Пилипенко О. М. Моделювання аеродинаміки сідельного автопотягу / О. М. Пилипенко, О. В. Батраченко, І. М. Литовченко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 2. – С. 27–34.

6. Андрейчик А. Ф. Влияние заднего спойлера полуприцепа на общее аэродинамическое сопротивление седельного автопоезда / А. Ф. Андрейчик и др. // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 2. – С. 30–33.

7. Пилипенко О. М. Дослідження аеродинамічних властивостей задніх спойлерів сідельних автопотягів / О. М. Пилипенко, О. В. Батраченко, І. М. Литовченко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 3.

8. Заявка на патент на винахід. Україна, МПК (2012) В 62В 35/00. Спосіб зменшення аеродинамічного опору вантажного автомобіля / Пилипенко О.М., Батраченко О. В. ; заявник і власник патенту Батраченко О. В.

9. Заявка № а201701297 на патент на винахід. Україна, МПК (2012) В 62В 35/00. Пристрій для зменшення аеродинамічного опору вантажного автомобіля / Пилипенко О.М., Батраченко О. В., Литовченко І. М. ; заявник і власник патенту Батраченко О. В.

10. Горяїнов О. М. Практика вантажних перевезень і логістики / О. М. Горяїнов. – Харків : Видавництво "Кортес-2001", 2008. – 323 с.

References

1. Evhrafov A.N. Aerodynamyka avtomobylia / A. N. Evhrafov. – M. : MHYU, 2010. – 356 s.

2. Belzile Marc. Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses. Technical Report [Elektronnyi resurs] / Marc Belzile. – Kanada, 2012. – Rezhym dostupu : www.tc.gc.ca.

3. Pevitt C. A Computational Simulation of Aerodynamic Drag Reductions for Heavy Commercial Vehicles / C. Pevitt, H. Chowdury, H. Moriaand, F. Alam // 18th Australasian Fluid Mechanics Conference. – Launceston, Australia. – 3–7 December 2012. – R. 54–84.

4. Rose McCallen. DOEsEffort to Reduce Truck Aerodynamic Drag through Joint Experiments and Computations [Elektronnyi resurs] / Rose McCallen et al. – SShA, 2006. – Rezhym dostupu : www1.eere.energy.gov.

5. Pylypenko O. M. Modeliuvannia aerodynamiky sidelnoho avtopotiahu / O. M. Pylypenko, O. V. Batrachenko, I. M. Lytovchenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – Khmelnytskyi : KhNU, 2017. – # 2. – S. 27–34.

6. Andreichyk A. F. Vlyianye zadneho spoilera poluprytsepa na obshchee aэrodynamycheskoe soprotyvlenye sedelnoho avtopoezda / A. F. Andreichyk y dr. // Mekhanyka mashyn, mekhanyzmov y materyalov. – 2014. – # 2. – S. 30–33.

7. Pylypenko O. M. Doslidzhennia aerodynamichnykh vlastyvostei zadnikh spoileriv sidelnykh avtopotiahiv / O. M. Pylypenko, O. V. Batrachenko, I. M. Lytovchenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – Khmelnytskyi : KhNU, 2017. – # 3.

8. Zaiavka na patent na vynakhid. Ukraina, MPK (2012) B 62V 35/00. Sposib zmenshennia aerodynamichnoho oporu vantazhnoho avtomobilia / Pylypenko O.M., Batrachenko O. V. ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Batrachenko O. V.

9. Zaiavka # a201701297 na patent na vynakhid. Ukraina, MPK (2012) B 62V 35/00. Prystrii dlia zmenshennia aerodynamichnoho oporu vantazhnoho avtomobilia / Pylypenko O.M., Batrachenko O. V., Lytovchenko I. M. ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Batrachenko O. V.

10. Horiainov O. M. Praktyka vantazhnykh perevezen i lohistyky / O. M. Horiainov. – Kharkiv : Vydavnytstvo "Kortes-2001", 2008. – 323 s.

Рецензія/Peer review : 21.6.2017 р. Надрукована/Printed :3.9.2017 р.
Рецензент: к.т.н., доц. Рубан Д.П.

УДК621.81

М.М. КОСІЮК, С.А. КОСТЮК
Хмельницький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КУЛЬОВОГО ШАРНІРА ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ

В статті розглянуто питання підвищення довговічності кульових шарнірів підвіски автомобіля. Проведено огляд останніх досліджень і публікацій та аналіз існуючих конструкцій кульових шарнірів. Запропоновано низку конструкторсько-технологічних рішень, спрямованих на підвищення довговічності кульового шарніра. Проведено удосконалення конструкції кульового шарніра з метою поліпшення його експлуатаційних можливостей і покращення зносостійкості сферичної трибосистеми «кульовий палець – вкладиш». Запропоновано саморегульований кульовий шарнір з пружним елементом типу тарілчастої пружини оригінальної конструкції. Проведено розрахунок силових параметрів та отримано характеристику жорсткості запропонованого пружного елемента. Розроблено методику комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану пружного елемента та проведено розрахунки на втомну міцність в системі SOLIDWORKS з використанням SOLIDWORKS simulation.

Ключові слова: кульовий шарнір, сферична поверхня, пружний елемент, вкладиш, палець.

M.M. KOSIYUK, S.A. KOSTYUK
Khmelnytsky National University

IMPROVING THE DESIGN SUSPENSION BALL JOINT CAR

In the article considered *question of* increase of durability *suspension balls joint car. Conducted review of recent research and publications and analysis of existing designs of balls joints. The proposed series of design and technological solutions designed to increase the longevity of a ball joint.* Conducted *improving the design ball joint* in order to improve *its* exploitations *capabilities and improved durability trybosystem ball finger-insert. A self-correcting ball joint with an elastic element type plate spring original design.* Conducted *calculation of power parameters and obtain a characteristic stiffness of the proposed elastic element.* Developed *the method of computer modelling of stress-strain state of the elastic element and made calculations on fatigue strength in the system SOLIDWORKS using SOLIDWORKS simulation.*

Keywords: balljoint, spherical surface, elastic element, insert, finger.

Постановка проблеми

В історії розвитку автомобілебудування зустрічаються різні конструктивні варіанти передньої та задньої підвіски автомобіля які поділяються на три типи: залежна, незалежна та напівзалежна.

Функціональним призначенням підвіски автомобіля є забезпечення пружного зв'язку між кузовом та колесами, пом'якшення поштовхів та ударів під час руху, за рахунок чого підвищується довговічність та керованість автомобіля, а водій і пасажири не відчувають дискомфорт. В залежності від типу підвіски та конструктивного виконання автомобіль має різні характеристики, такі як: динамічна стійкість, керованість, плавність ходу та маневреність на високих швидкостях [1]. В сучасному автомобілебудуванні широкого застосування набула незалежна підвіска (рис. 1), яка в свою чергу поділяється на декілька типів:підвіска типу «MacPherson» (рис. 1, а) – це підвіска колеса, яка включає в себе один важіль, стабілізатор поперечної стійкості, телескопічну стійку з амортизатором, та один кульовий шарнір і забезпечує переміщення колеса відносно кузова вверх-вниз та поворот; двох важільна підвіска включає дві кульових опори на одне колесо (рис. 1, б); багато важільна підвіска може мати три, чотири кульових шарніра на одне колесо (рис. 1, в).

а) б) в)

Рис.1. Типи незалежних підвісок
а) одноважільна типу «MacPherson»; б) двоважільна; в) багатоважільна

Кульовий шарнір підвіски автомобіля – відповідальний вузол, який з'єднує важіль з маточиною підшипникового вузла та сприймає значні просторові навантаження, що виникають під час руху. На рис. 2 представлені типові кульові шарніри у різних конструктивних виконаннях.

Рис. 2. Типові кульові шарніри автомобіля у різних конструктивних виконаннях

У високотехнологічних сучасних автомобілях кульові шарніри широко використовуються в тягах стабілізаторів поперечної стійкості (рис. 3).

Як показує досвід експлуатації автомобілів більшість відмов підвіски спричинена виходом з ладу кульових шарнірів. В процесі експлуатації деталі кульової опори працюють в умовах граничного змащування, що призводить до передчасного зношування контактуючих поверхонь та утворення зазору у спряжені палець-вкладиш. У відповідності до ГОСТ Р 52433-2005 «Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний» момент хитання повинен лежати в межах 2–7 Н·м, а максимальна величина зазору в парі тертя палець-вкладиш не повинна перевищувати 0.7 мм [2].

Рис. 3.Тяга стабілізатора поперечної стійкості

Підвищення довговічності за рахунок конструкторсько-технологічних рішень, які б забезпечували високі експлуатаційні характеристики та дозволяли підвищити ресурс кульового шарніра є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість кульових шарнірів підвіски автомобілів відрізняються лише типорозмірами та конструктивним виконанняму залежності від призначення та маси автомобіля.

Відомі кульові шарніри з різноманітним конструктивним виконанням корпусу (рис. 4): а) зварні з заливним вкладишем; б) закатні зверху; в) закатні знизу; г) цільноковані з пружинним кільцем; д) цільноковані з обтисканням з низу; е) з різьбовою кришкою.

У заливних шарнірах в якості наповнювача використовуються полімерний заливний матеріал сирфен, або різноманітні реактопласти, а у всіх інших конструкціях – композиційні матеріали на основі поліамідів [3].

До суттєвого недоліку наведених заливних конструкцій слід віднести – відсутність мастило утримуючих канавок вкладиша, в наслідок чого створюються умови граничного тертя.

Головною деталлю кульових шарнірів є кульовий палець. Його неповна сферична поверхня (НСП), яка охвачена полімерним вкладишем закріпленим у корпусі, утворює пару тертя палець – вкладиш. Постійні коливальні та обертові рухи пальця під час експлуатації автомобіля викликають інтенсивні відносні переміщення робочих поверхонь пари тертя палець – вкладиш під навантаженням, що приводить до їх зношування. Поява зазору у спряжені і люфт пальця сприяє збільшенню динамічних навантажень та інтенсифікації подальшого процесу зношування робочих поверхонь пари тертя палець-вкладиш, що призводить до втрати нормальної працездатності підвіски автомобіля [4].

Відомий кульовий шарнір [5], що містить палець із кульовою голівкою, розміщений на ній вкладиш, установлений у корпусі, підтиснутий пружним елементом і закритий заглушкою. Вкладиш складається із двох частин. Частина вкладиша, що контактує із пружним елементом, має поздовжній розріз, а між частинами вкладиша при складанні створено зазор для його вибирання за час гарантійного терміну експлуатації кульового шарніра.

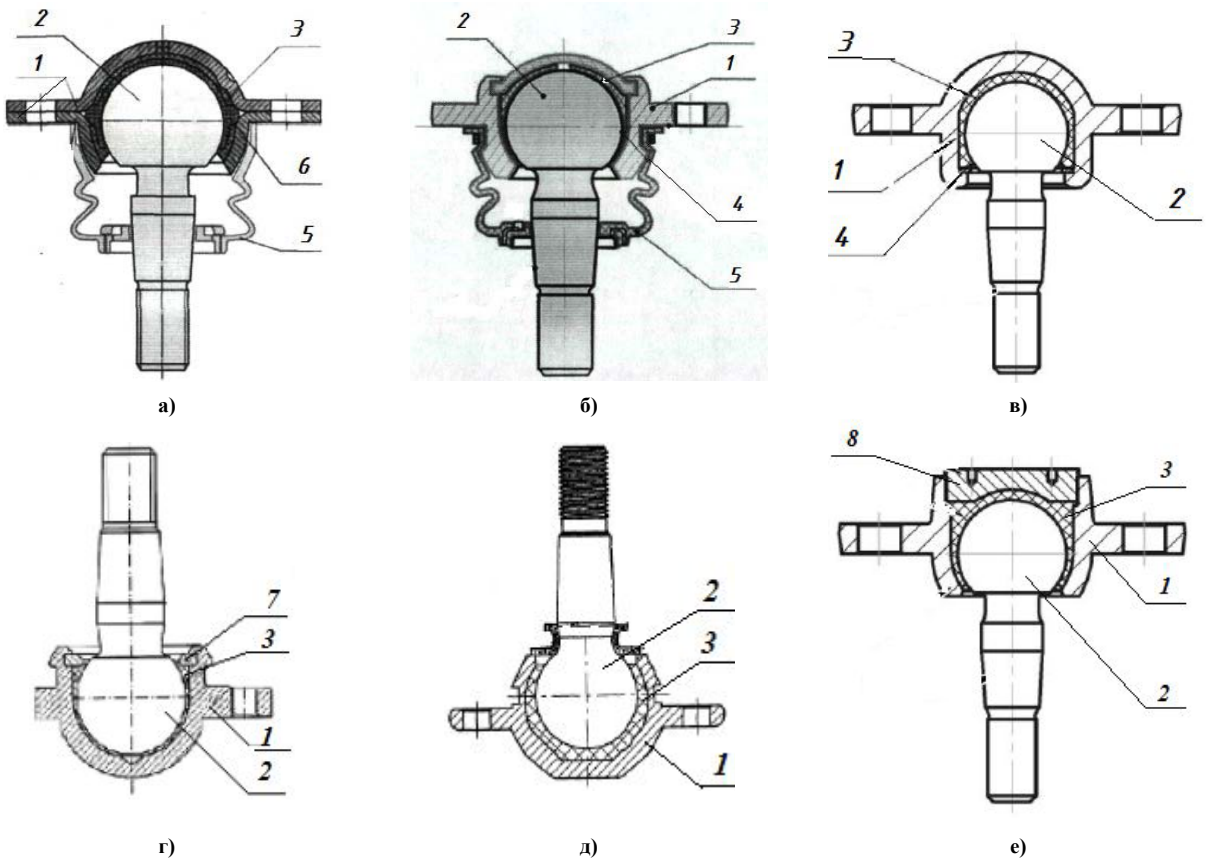


Рис. 4. Кульові шарніри з різноманітним виконанням корпусу:
1 – корпус; 2 – палець; 3 – вкладиш; 4 – кришка; 5 – захисний чохол;
6 – заливний матеріал; 7 – пружинне кільце; 8 – шайба

Недоліком даної конструкції є недостатня надійність, зниження експлуатаційних властивостей кульового шарніра внаслідок зменшення стабільності моментів хитання й обертання.

Також відома конструкція кульового шарніра [6], що містить корпус, палець із кульовою головкою, розміщений у корпусі полімерний вкладиш, що складається із двох частин, піджатий пружним елементом і закритий заглушкою. Між пружним елементом і верхньою частиною вкладиша розташована шайба з металу.

Однак даний кульовий шарнір при своєму використанні має недостатньо високі зносостійкість і довговічність через погане змащення поверхонь тертя пари кульовий палець-вкладиш.

Аналіз приведених кульових шарнірів у різних конструктивних виконаннях, вказує на необхідність проведення конструкторсько-технологічних заходів для удосконалення їх конструкцій, спрямованих на підвищення довговічності пари тертя палець-вкладиш.

Мета роботи – удосконалення конструкції кульового шарніра підвіски автомобіля шляхом підвищення довговічності роботи через поліпшення його експлуатаційних можливостей і покращення зносостійкості сферичної трибосистеми кульовий палець-вкладиш.

Виклад основного матеріалу дослідження

У роботі пропонується низка конструкторських і технологічних рішень, які забезпечують суттєве підвищення довговічності сферичних шарнірних з’єднань.

Запропоновано модернізовану конструкцію кульового шарніра [7], вид якого представлений на рис. 5.

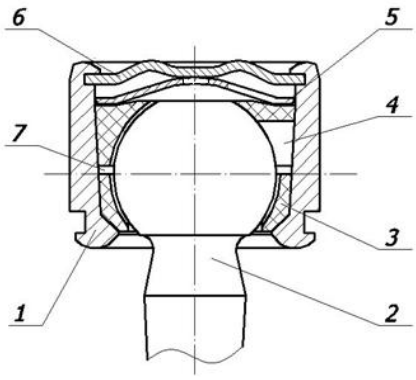


Рис. 5. Кульовий шарнір:
1 – корпус; 2 – палець з кульовою головкою; 3 – вкладиш нижній; 4 – вкладиш верхній;
5 – пружній елемент; 6 – кришка; 7 – зазор

Кульовий шарнір містить корпус 1, у конусному гнізді якого встановлено полімерний вкладиш 3 і 4, виконаний з можливістю осьового переміщення в гнізді корпусу 1 (наприклад, через наявність розрізів, канавок) і виготовлений із композиційного матеріалу із антифрикційними наповнювачами (наприклад, виготовлення вкладишу з полімеру, армованого вуглеволокном), що охоплює палець 2 з кульовою головкою, поверхневий шар якої зміцнений і має мікрорельєф для утримання мастила (сформований,

наприклад, поверхнево-пластичним деформуванням). Вкладиш складається із двох частин: нижньої частини 3 й верхньої частини 4. Верхня частина 4 вкладиша та нижня 3 розміщені в конічній частині гнізда корпусу 1. Між верхньою частиною 4 вкладиша й нижньою частиною 3 вкладиша є зазор 7. У корпусі 1, над верхньою частиною 4 вкладиша розміщений пружній елемент 5 заглушки 6. Заглушка 6 фіксується в корпус 1, наприклад, вальцюванням.

Кульовий шарнір збирається в такий спосіб. У конічну частину гнізда корпусу 1 запресовується нижня частина вкладиша 3, потім установлюється палець 2 з кульовою головкою так, щоби нижня частина вкладиша 3 охоплювала кульову головку. На кульову голівку пальця 2 попередньо наносять мастило. Після чого в конічну частину гнізда корпусу 1 послідовно встановлюють верхню частину вкладиша 4, заглушку 6 з пружинним елементом 5. Заглушка 6 фіксується в корпусі 1 вальцюванням.

Робота пропонованого кульового шарніра здійснюється при установлені його у підвіску і русі транспортного засобу.

Під час роботи конструктивні елементи кульового шарніра - корпус 1, полімерні вкладиші 3, 4 і кульовий палець 2, зазнають значних знакозмінних навантажень. При фіксуванні заглушки 6 в корпусі 1 відбувається первина деформація пружного елемента 5, який під час експлуатації забезпечує осьове переміщення вкладиша 4, завдяки зазору 7, а також щільність посадки кульової головки і вкладиша, стабілізує моменти хитання й обертання в кульовому шарнірі. Пропонована конструкція є саморегульованою.

Максимально-допустима сила затиску пальця 2 вкладишами 3 і 4 (рис. 5), що забезпечується за рахунок пружного елемента типу тарілчастої пружини визначається відповідно до моменту хитання пальця, величина якого за ГОСТ Р 52433-2005 «Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний» лежить в межах $M_f = 2 – 7$ Н·м.

Сила затиску Р розраховується за формулою:

$$P= M_f/2Rf \quad (1)$$

де M_f – момент хитання пальця, Н·м; R – радіус сфери, мм; f – коефіцієнт тертя.

Прийнявши R= 12,5 мм; f = 0,035 (для сталь-полімер), за формулою (1) знаходимо необхідну силу затиску:

$$P_{min}= M_{fmin}/2Rf = 2/2\cdot0{,}0125\cdot0{,}035=2285 \text{ Н}; \quad (2)$$

$$P_{max}= M_{fmax}/2Rf = 7/2\cdot0{,}0125\cdot0{,}035=8000\text{Н}. \quad (3)$$

Для подальших розрахунків пружного елемента приймаємо: P_{min} =2300 Н, P_{max}=4000 Н.

Основними параметрами пружного елемента типу тарілчастої пружини (рис. 6), що визначають силу пружності є:

зовнішній діаметр D, діаметр внутрішнього отвору d, товщина пружини s, висота h_o та максимально-допустима деформація f.

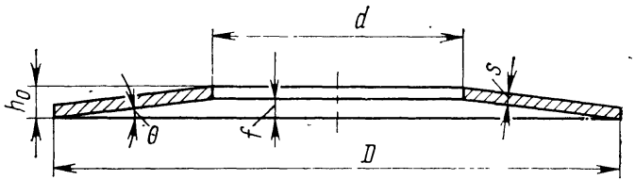


Рис. 6. Тарілчаста пружина

Враховуючи конструктивні особливості кульового шарніра запропоновано пружній елемент типу тарілчастої пружини оригінальної конструкції (зі збільшеною опорною поверхнею та прорізами) (рис. 7, 8), виготовлений холодною штамповкою із попередньо термічно обробленої листової сталі 60С2Апо ГОСТ 14959-88 товщиною 1,5 мм.

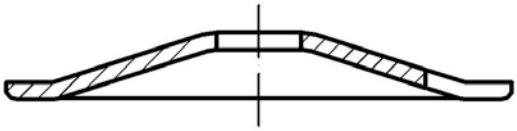


Рис. 7. Пружній елемент

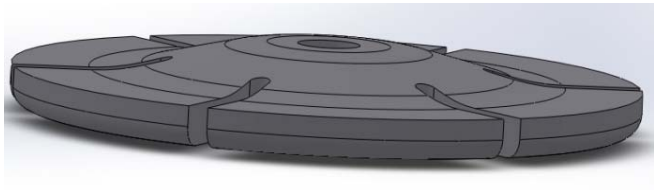


Рис. 8. 3D модель пружного елемента

Розрахунок навантаження необхідного для визначення величини осадки проводиться за формулою (4) [8]:

$$P = \frac{2}{3}\,\frac{\pi E s \lambda_1}{(D-d)^2}\ln\frac{D}{d}\left[(f-\lambda_1)\left(f-\frac{\lambda_1}{2}\right)+s^2\right], \quad (4)$$

де E – модуль пружності МПа; s – товщина пружини мм ; λ_i – осадка, мм; f – максимально допустима деформація.

Дані розрахунків жорсткістної характеристики пружини представлена на графіку, рис. 9.

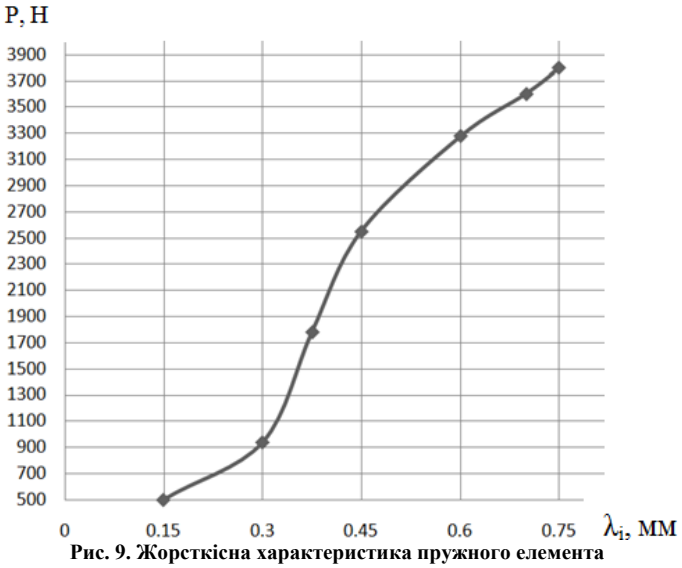


Рис. 9. Жорсткісна характеристика пружного елемента

Розроблено методику комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану пружного елемента та проведено розрахунки на втомну міцність для максимально-допустимих умов, що виникають в ході експлуатації автомобіля з використанням програмного комплексу SOLIDWORKS і додатку SOLIDWORKS simulation.

На рис. 10 наведено імітаційну модель навантаження пружного елемента, а на рис. 11 – контурний графік напружено-деформованого стану.

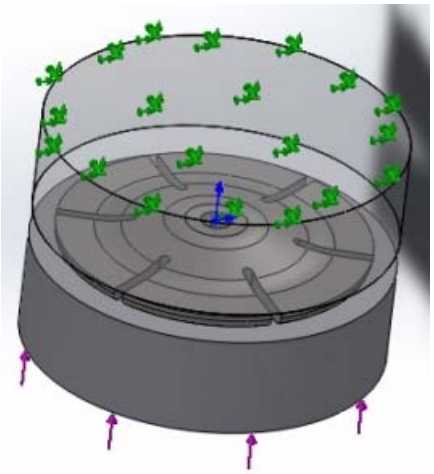


Рис. 10. Імітаційна модель навантаження пружного елемента

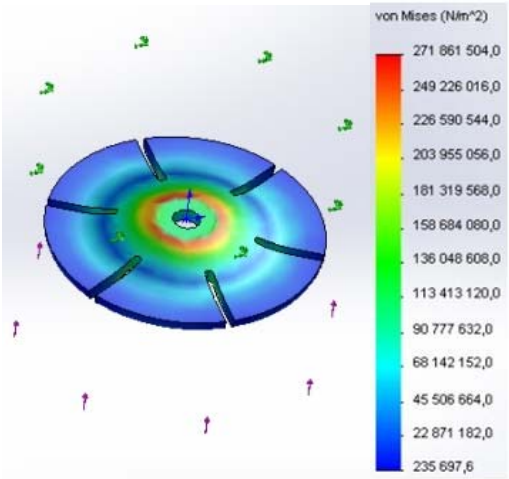


Рис. 11. Контурний графік розподілу напружень

Для перевірки конструкції пружного елемента на втомну міцність проведено розрахунки з визначення строку служби (кількості циклів), результати яких представлені на рис. 12.

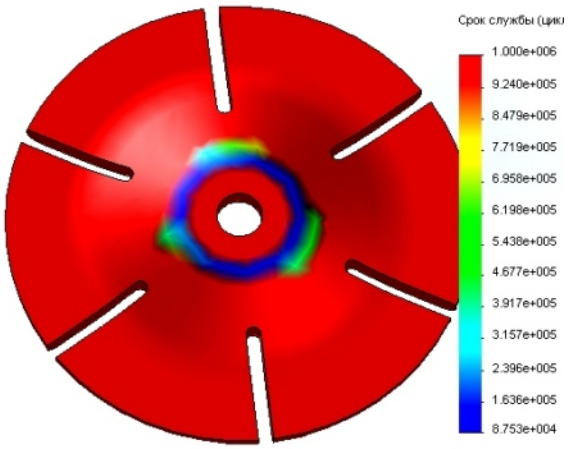


Рис. 12. контурний графік розподілу втомних навантажень

Проведені дослідження дають можливість пересвідчитись у тому, що пружній елемент працює без перенавантажень та не зруйнується раніше експлуатаційного терміну.

Експериментальні дослідження кульових шарнірів, виготовлених у відповідності до запропонованої конструкції, підтвердили підвищення їх експлуатаційних властивостей і зниження трудомісткості при технічному обслуговувані.

Висновки

Розглянуто існуючі конструкції кульових шарнірів. Проведено аналіз конструкторсько-технологічних рішень, спрямованих на підвищення довговічності роботи вузла. Запропоновано удосконалену конструкцію саморегульованого кульового шарніра із оригінальним пружним елементом, яка дозволяє підвищити його довговічність через поліпшення умов роботи пари тертя палець-вкладиш. Розроблено методику комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану пружного елемента і проведені дослідження довговічності його роботи. Випробування удосконаленої конструкції кульового шарніру підтвердили його ефективність.

Література

1. Подвеска автомобіля [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.avtotut.ru/repair/ equipment/ Podveska/. – 14.01.2014.

2. Шкуратяний Ю.В. Кульові шарніри/технічні вимоги / Ю.В. Шкуратяний, М.О. Стучинський // Науково-виробничий журнал. – 2014. – № 2 (238).

3. Гун И.Г. Совершенствование технологической системы изготовления шаровых шарниров / И.Г. Гун. – М. : Изд-во МТТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 416 с.

4. Костюк С.А. Підвищення довговічності сферичних шарнірних з'єднань / С.А Костюк М.М. Косіюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2017. – № 2. – С. 71–73.

5. Пат. 31155 Российская Федерация, МПК F16C 11/06. Шаровая опора / Ситковский А.Г., Комаров А.А. ; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество "Кедр". – заявл. 13.05.2002 ; опубл. 20.07.2003, Бюл. № 20.

6. Пат. 123870 Российская Федерация, МПК F16C 11/06. Шаровая опора / Арбузов В.И., Лебядок И.Д. ; заявитель и патентообладатель Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью "Фенокс" (BY). – заявл. 13.08.2012 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.

7. Патент на корисну модель 116145 Україна, МПК F16C 11/06. Кульовий шарнір / Косіюк М.М, Костюк С.А. ; заявник і власник патенту Хмельницький національний університет ; заявл. 21.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

8. Пономарев С.Д. Расчет упругих елементов машин и приборов : монографія / С.Д. Пономарев, Л.Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.

References

1. Podveska avtomobilia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.avtotut.ru/repair/ equipment/ Podveska/. – 14.01.2014.

2. Shkuratianyi Yu.V. Kulovi sharniry/tekhnichni vymohy / Yu.V. Shkuratianyi, M.O. Stuchynskyi // Naukovo-vyrobnychyi zhurnal. – 2014. – # 2 (238).

3. Hun Y.H. Sovershenstvovanye tekhnolohycheskoi systemы yzghotovlenyia sharovykh sharnyrov / Y.H. Hun. – M. : Yzd-vo MTTU ym. N.E. Baumana, 2000. – 416 s.

4. Kostiuk S.A. Pidvyshchennia dovhovichnosti sferychnykh sharnirnykh ziednan / S.A Kostiuk M.M. Kosiiuk // Herald of Khmelnytsky National University. – 2017. – # 2. – S. 71–73.

5. Pat. 31155 Rossyiskaia Federatsyia, MPK F16C 11/06. Sharovaia opora / Sytkovskyi A.H., Komarov A.A. ; zaiavytel y patentoobladatel Zakrytoe aktsyonernoe obshchestvo "Kedr". – zaiavl. 13.05.2002 ; opubl. 20.07.2003, Biul. # 20.

6. Pat. 123870 Rossyiskaia Federatsyia, MPK F16C 11/06. Sharovaia opora / Arbuzov V.Y., Lebiadok Y.D. ; zaiavytel y patentoobladatel Nauchno-proyzvodstvennoe obshchestvo s ohranychennoi otvetstvennostiu "Fenoks" (BY). – zaiavl. 13.08.2012 ; opubl. 10.01.2013, Biul. # 1.

7. Patent na korysnu model 116145 Ukraina, MPK F16C 11/06. Kulovyi sharnir / Kosiiuk M.M, Kostiuk S.A. ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Khmelnytskyi natsionalnyi universytet ; zaiavl. 21.11.2016 ; opubl. 10.05.2017, Biul. # 9.

8. Ponomarev S.D. Raschet upruhykh elementov mashyn y pryborov : monohrafiia / S.D. Ponomarev, L.E. Andreeva. – M. : Mashynostroenye, 1980. – 326 s.

Рецензія/Peer review : 26.7.2017 р. Надрукована/Printed :20.8.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

УДК 621. 643. 053

С.В. МАЗУР, В.М. СТРІЛЕЦЬ, О.Р. СТРІЛЕЦЬ, О.Ю. ТИМЕЙЧУК
Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ З КАНАВКОЮ НА ТОРЦІ ОБЕРТОВОГО КІЛЬЦЯ У ВИГЛЯДІ СПІРАЛІ АРХІМЕДА

У статті розглядаються конструкції та принцип роботи торцевих ущільнень підвищеної герметичності з канавкою на торці обертового кільця у вигляді спіралі Архімеда. Герметизація ущільнення здійснюється стиком кілець тертя за рахунок їх притискання натискним елементом через пружину. Рідина, що знаходиться в ущільненій порожнині, намагається проникнути назовні через стик кілець і потрапляє в канавку, у вигляді спіралі Архімеда, на торці обертового кільця. Описується тепловий режим роботи нових конструкцій торцевих ущільнень для варіанту прямокутного поперечного перетину кільця з двома прямокутними, або трикутними, або трапецевидними канавками на торці. Математична модель дослідження розподілу температур по поперечному перетину кільця в двовимірній постановці подана у вигляді рівняння Лапласа, яке описує стаціонарний або квазістаціонарний розподіл температури. Отримані аналітичні вирази для оцінки теплових параметрів торцевих ущільнень підвищеної герметичності з канавкою на торці обертового кільця у вигляді спіралі Архімеда, та за допомогою комп'ютерного моделювання побудовані їх графічні залежності. Проведені дослідження теплових параметрів роботи нових конструкцій торцевих ущільнень з канавкою у вигляді спіралі Архімеда на торці обертового кільця, підтверджують їх роботоздатність.

Ключові слова: торцеве ущільнення, обертове і необертове кільце, торець, пара тертя, канавка, спіраль Архімеда, температура.

S.V. MAZUR, V. M. STRILETS, O. R. STRILETS, O.Y. TYMEICHUK
National University of Water And Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

JUSTIFICATION OF THERMAL PARAMETERS OF MECHANICAL SEALS WITH GROOVE IN FORM OF THE ARCHIMEDEAN SPIRAL ON THE END FACE OF A ROTATING RING

The article deals with the design and working principle of mechanical seal of increased integrity. Mechanical seals consist of non-rotating and rotating friction rings. Non-rotating ring installed in the housing, and rotating ring - in the sleeve, which is connected to the shaft by key. On the face surface of the rotating ring groove is made as an Archimedean spiral. Non-rotating and rotating friction rings pressed together by the pressure element through spring. When the shaft stopped, hermetization of seal carried out due to junction of friction rings by pressing them together with the pressure element through the spring. Densified fluid trying to penetrate through the junction of friction rings outside and falls into the groove in form of Archimedean spiral. Under the action of centrifugal force condensed fluid is pressed against the outer surface of the groove and by the force of friction that occurs between the fluid and the end face of non-rotating ring, moves to open exit on the outer surface and returns to a hardened cavity. Describes the thermal mode of the new mechanical seal for cases of rectangular cross-section of the ring with two rectangular or triangular or trapezoid grooves on the end face. Mathematical model of the temperature distribution on the cross-section of the ring in a two-dimensional setting presented as a Laplace equation that describes the steady temperature distribution for the boundary conditions at the initial time on the outer surface of the rotating ring. Analytical expressions obtained for estimation of thermal parameters of mechanical seal of increased tightness with groove on the end face of the rotating ring as an Archimedean spiral and using computer modelling their graphical dependence built. Our studies confirm the workability of the new mechanical seal of increased tightness.

Key words: mechanical seal, rotating and non-rotating ring, end face, pair of friction, groove, Archimedean spiral, temperature.

Постановка проблеми

Для ущільнення валів насосів машин і механізмів нафтопереробної, хімічної та інших галузей народного господарства широко застосовують торцеві ущільнення. Основними деталями цих ущільнень є обертове і необертове кільця, які своїми торцями утворюють пару тертя для створення герметичної камери з ущільненою рідиною. Умови їх експлуатації досить різноманітні, оскільки важко назвати область техніки, де не виникає проблема герметизації. Досить часто саме ущільнення визначають експлуатаційні показники машин, бо їхня відмова в роботі приводить до істотних втрат рідини, що транспортується. Таким чином, ці досить прості за конструкцією і малі за розмірами деталі грають важливу роль у роботі механізмів і машин. Головним напрямком використання торцевих ущільнень є герметизація техніки, яка працює з рідинами під високим тиском, з вмістом твердих частинок, які являють собою агресивне середовище по відношенню до оточуючих матеріалів, у кріогенних системах і вакуумі. Такі важкі умови експлуатації торцевих ущільнень ведуть до значного спрацювання кілець тертя та частих відмов їх роботи. Тому виникають задачі створення нових торцевих ущільнень, які б забезпечували надійну герметизацію рухомих з'єднань, при спрацюванні пари тертя протягом більшого терміну у порівнянні з існуючими конструкціями. Крім того, вони мають мати просту конструкцію, щоб на них менше впливали або зовсім не впливали чинники, які ускладнюють роботу торцевих ущільнень. Для цього запропоновані нові конструкції торцевих ущільнень з канавкою у вигляді спіралі Архімеда на торці обертового кільця.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми ущільнення валів насосів машин і механізмів нафтопереробної, хімічної та інших галузей народного господарства широко описані у літературі [1–3] та іншій. Останнім часом виконаний огляд і проведений широкий аналіз конструкцій торцевих ущільнень підвищеної герметичності [4], розроблені нові конструкції торцевих ущільнень на рівні патентів України [5, 6] і спосіб виготовлення канавки у вигляді спіралі Архімеда на торці обертового кільця [7], прийняли участь на наукових конференціях і симпозіумах [8–10]. Однак теоретичні дослідження для запропонованих нових конструкцій торцевих ущільнень з

канавкою у вигляді спіралі Архімеда на торці обертового кільця не проведені.

Мета роботи

Метою роботи є вивчення будови і принципу роботи торцевих ущільнень з канавкою у вигляді спіралі Архімеда на торці обертового кільця і теоретично-комп'ютерне дослідження теплового режиму в парі тертя - на торці обертового і необертового кілець при поверненні проникаючої назовні рідини у герметичну камеру.

Реалізація роботи

Одна із конструкцій торцевого ущільнення з канавкою у вигляді спіралі Архімеда на торці обертового кільця показана на рис.1. Торцеве ущільнення складається з необертового кільця тертя 1, яке встановлене в корпусі 2, загерметезоване вторинними ущільненнями 3 і 4 та закріплене штифтами 5, обертового кільця тертя 6, на торцевій поверхні якого виконані канавки 7 у вигляді спіралі Архімеда. Обертове кільце тертя 6 встановлене у втулці 8, загерметезоване вторинними ущільненнями 9 і 10 та закріплене штифтами 11. Втулка 8 з'єднана з валом 12 шпонкою 13 і герметизується вторинним ущільненням 14. Притискання кілець тертя 1 і 6 здійснюється натискним елементом 15 через пружину 16.

Торцеве ущільнення працює так. При зупиненому валу 12 герметизація ущільнення здійснюється стиком кілець тертя 1 і 6 за рахунок їх притискання натискним елементом 15 через пружину 16. При обертанні вала 12 через шпонку 13 і штифти 11 обертається обертове кільце тертя 6. Ущільнена рідина намагається проникнути через стик кілець тертя 1 і 6 назовні і потрапляє в канавку 7 у вигляді спіралі Архімеда. Під дією відцентрової сили ущільнена рідина притискається до зовнішніх поверхонь канавки 7 і під дією осьової сили, яка створюється в канавці 7 і сили тертя яка виникає між рідиною і торцем не обертового кільця, просувається до відкритого виходу на зовнішній поверхні та повертається назад в ущільнену порожнину. Внаслідок тертя, що виникає у контакті необертового 1 і обертового 6 кілець, виділяється тепло, яке має відповідати критерію роботоздатності – теплостійкість.

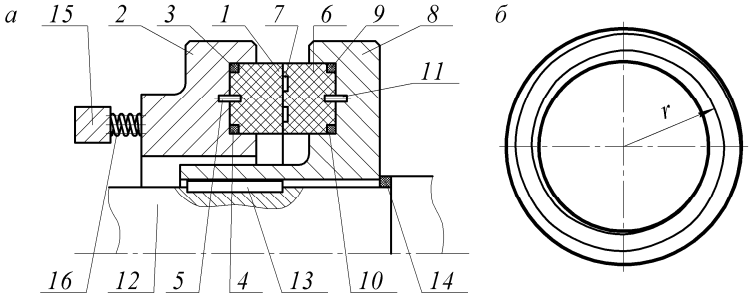


Рис. 1. ***а*** **– конструктивна схема нового торцевого ущільнення; б – схема торця обертового кільця з канавкою у вигляді спіралі Архімеда**

Для дослідження теплового режиму в парі тертя торцевого ущільнення з канавкою на торці обертового кільця у вигляді спіралі Архімеда, розглянуті кільця з такими поперечними перетинами: суцільний; з прямокутною канавкою; з канавкою у вигляді прямокутного трикутника і з канавкою у вигляді прямокутної трапеції, показані на рис. 2.

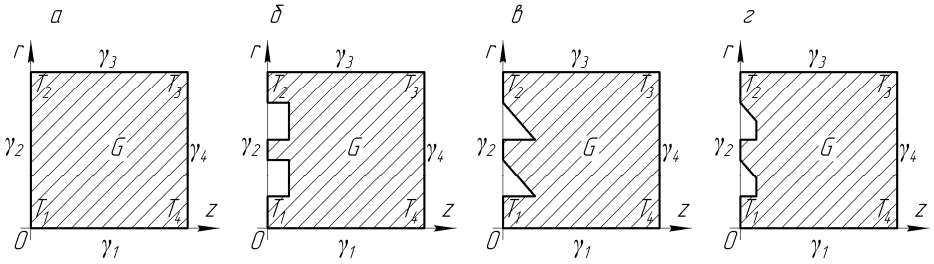


Рис. 2. Схеми поперечного перетину обертових кілець: ***а*** **– суцільний;** ***б*** **– з прямокутною канавкою;** ***в*** **– з канавкою у вигляді прямокутного трикутника;** ***г*** **– з канавкою у вигляді прямокутної трапеції**

У даній статті досліджується тепловий режим роботи торцевого ущільнення в двовимірній постановці з врахуванням змащення на процес теплопровідності. Покажемо хід рішення задачі на прикладі схеми рис. 2, *а*. Математична модель задачі дослідження теплового режиму роботи торцевого ущільнення в двовимірній постановці описується такою крайовою задачею:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dfrac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0; & (1) \\ T(z,r,0) = T, 0 \le z \le z_1, 0 \le r \le r_1; & (2) \\ \gamma_1 : T(z,0) = (T_4 - T_1) \cdot z/10 + T_1; & (3) \\ \gamma_2 : T(0,r) = (T_2 - T_1) \cdot r^2/r_1^2 + T_1; & (4) \\ \gamma_3 : T(z,r_1) = (T_3 - T_2) \cdot z/10 + T_2; & (5) \\ \gamma_4 : T(z_1,r) = (T_3 - T_4) \cdot r/r_1 + T_4. & (6) \end{cases}$$

Рівняння Лапласа (1) описує стаціонарний розподіл температури у поперечному перетині кільця

торцевого ущільнення. Умова (2) описує розподіл температури в початковий момент часу. Граничні умови (3)-(6) задають розподіл температури на зовнішній поверхні кільця торцевого ущільнення, де $T_1,\ T_2,\ T_3,\ T_4$ – температури у кутових точках поперечного перетину кільця.

Поставлену задачу розв'яжемо чисельним методом. Одним з найбільш простих та універсальних чисельних методів розв'язування диференціальних рівнянь з частковими похідними є метод сіток або метод скінченних різниць. Ідея цього методу полягає в заміні похідних або диференціалів функції їх кінцево-різницевими співвідношеннями. Нехай в площині *xOy* задана деяка область *G* з межею *Г* (рис. 3, *а*). Проведемо дві сім'ї паралельних прямих паралельно до осей координат:

$$x_i = i \cdot h_1,\ i = \overline{0,n},\ y_j = j \cdot h_2,\ j = \overline{0,m}, \tag{7}$$

і отримаємо різницеву сітку з кроками h_1 і h_2.

Точки перетину прямих називаються вузлами. Вузли, для яких всі чотири сусідніх вузли належать області *G* називаються внутрішніми вузлами (на рис. 3, *а* позначені хрестиками), а решта виділених вузлів називають граничними вузлами.

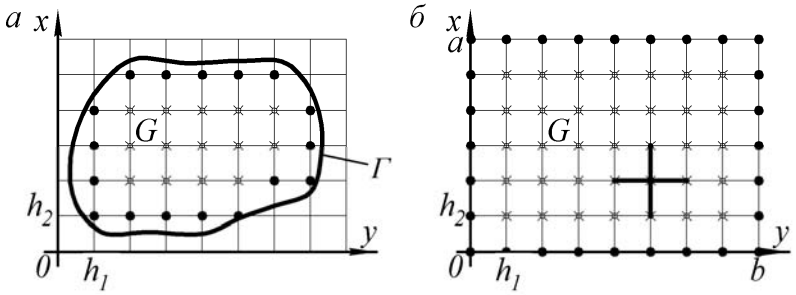


Рис. 3. а – сіткова область для неперервної області G; б – прямокутна область G.

В кожному внутрішньому вузлі сітки замінимо часткові похідні функції *u(x,y)* їх різницевими співвідношеннями:

правосторонні:

$$\frac{\partial u(x_i, y_j)}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{ij}}{h_1}, \qquad \frac{\partial u(x_i, y_j)}{\partial y} \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{ij}}{h_2}, \tag{8}$$

лівосторонні:

$$\frac{\partial u(x_i, y_j)}{\partial x} \approx \frac{u_{ij} - u_{i-1,j}}{h_1}, \qquad \frac{\partial u(x_i, y_j)}{\partial y} \approx \frac{u_{ij} - u_{i,j-1}}{h_2}, \tag{9}$$

центральні:

$$\frac{\partial u(x_i, y_j)}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2 \cdot h_1}, \qquad \frac{\partial u(x_i, y_j)}{\partial y} \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2 \cdot h_2}, \tag{10}$$

$$\frac{\partial^2 u(x_i, y_j)}{\partial x^2} \approx \frac{u_{i+1,j} - 2 \cdot u_{ij} + u_{i-1,j}}{h_1^2}, \qquad \frac{\partial^2 u(x_i, y_j)}{\partial y^2} \approx \frac{u_{i,j+1} - 2 \cdot u_{ij} + u_{i,j-1}}{h_2^2}. \tag{11}$$

Ці заміни часткових похідних їх різницевими співвідношеннями в кожному вузлі сітки дозволяють звести розв'язок рівнянь з частковими похідними до розв'язку системи різницевих рівнянь.

Задача Діріхле для рівняння Лапласа формулюється так:

знайти функцію *u=u(x, y),* що задовольняє в області G рівняння

$$\Delta u \equiv \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \tag{12}$$

а на межі Г задовольняє граничним умовам –

$$u\big|_{\Gamma} = \varphi(x, y). \tag{13}$$

Нехай область *G* – прямокутник з розмірами $a \times b$. Виберемо кроки h_1 по *x* та h_2 *по y* і побудуємо сітку (рис. 3, *б*):

$$x_i = i \cdot h_1,\ i = \overline{0,n}, \qquad y_j = j \cdot h_1,\ j = \overline{0,m}. \tag{14}$$

Виберемо п'ятиточковий шаблон „хрест" (рис. 3, б) і отримаємо задачу Діріхле на цьому шаблоні. Замінимо часткові похідні в рівнянні (12) їх різницевими співвідношеннями (8, 11)

$$\frac{u_{i+1,j} - 2 \cdot u_{ij} + u_{i-1,j}}{h_1^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2 \cdot u_{ij} + u_{i,j-1}}{h_2^2} = 0. \tag{15}$$

Рівняння (15) разом із значеннями u_{ij} в граничних вузлах утворюють систему лінійних

алгебричних рівнянь. Найбільш простий вигляд ця система має для прямокутної області і для $h_1 = h_2 = h$. У цьому випадку система різницевих рівнянь (15) матиме такий вигляд:

$$\frac{u_{i+1,j} - 2 \cdot u_{ij} + u_{i-1,j}}{h^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2 \cdot u_{ij} + u_{i,j-1}}{h^2} = 0. \quad (16)$$

Після нескладних перетворень отримаємо

$$u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j+1} - 4 \cdot u_{ij} = 0, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, m} - 1. \quad (17)$$

Граничні умови (13) матимуть такий вигляд:

$$\begin{cases} u_{i0} = \varphi_{i0}, & u_{im} = \varphi_{im}, \quad i = \overline{1, n-1}, \\ u_{0j} = \varphi_{0j}, & u_{nj} = \varphi_{nj}, \quad j = \overline{1, m-1}. \end{cases} \quad (18)$$

Систему різницевих рівнянь (17) та граничні умови (18) називають різницевою апроксимацією або різницевою схемою крайової задачі (1)-(6), яка є системою (n-1)×(m-1) лінійних алгебричних рівнянь.

Розв'яжемо різницеву систему (17) і (18) ітераційним методом з усередненням Лібмана. Систему (17) запишемо у вигляді

$$u_{ij} = \frac{1}{4}\left(u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j+1}\right), \quad i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, m} - 1. \quad (19)$$

Відповідно методу Лібмана обчислення будемо вести так:

1) виберемо деяке початкове наближення $u_{ij}^{(0)}$, як середнє арифметичне значення в чотирьох сусідніх граничних вузлах

$$u_{ij}^{(0)} = \frac{1}{4}\left(u_{i0} + u_{im} + u_{0j} + u_{nj}\right), \quad i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, m} - 1. \quad (20)$$

2) послідовні наближення $u_{ij}^{(k+1)}$, з використанням (19), будемо шукати за ітераційною формулою

$$u_{ij}^{(k+1)} = \frac{1}{4}\left(u_{i-1,j}^{(k)} + u_{i+1,j}^{(k)} + u_{i,j-1}^{(k)} + u_{i,j+1}^{(k)}\right), \quad i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, m} - 1. \quad (21)$$

Далі обчислюють послідовні наближення $u_{ij}^{(k+1)}$ у кожному внутрішньому вузлі сітки за формулою (21) до виконання умови між двома сусідніми ітераціями

$$\left| u_{ij}^{(k+1)} - u_{ij}^{(k)} \right| \le \varepsilon, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (22)$$

Були проведені розрахунки розподілу температури у торцевих ущільненнях з обертовими кільцями з поперечними перетинами показаними на рис. 2 з використанням ПЕОМ при таких вихідних даних:

$$T_1 = 60^0 C, \; T_2 = 30^0 C, \; T_3 = 25^0 C, \; T_4 = 55^0 C, \; r = 100 мм, \; z = 10 мм.$$

Для більш наочного аналізу за результатами розрахунків побудовані графіки залежностей $T = T(z_\otimes, r)$, де $z_\otimes$ — постійний параметр (ширина кільця), r - внутрішній радіус кільця.

Розрахунки проводились до виконання умови між двома сусідніми ітераціями

$$\left| T_{ij}^{(k+1)} - T_{ij}^{(k)} \right| \le 0{,}1, \quad i = \overline{1, n-1}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (23)$$

Результати розрахунків подані у вигляді графіків на рис. 4 – 7.

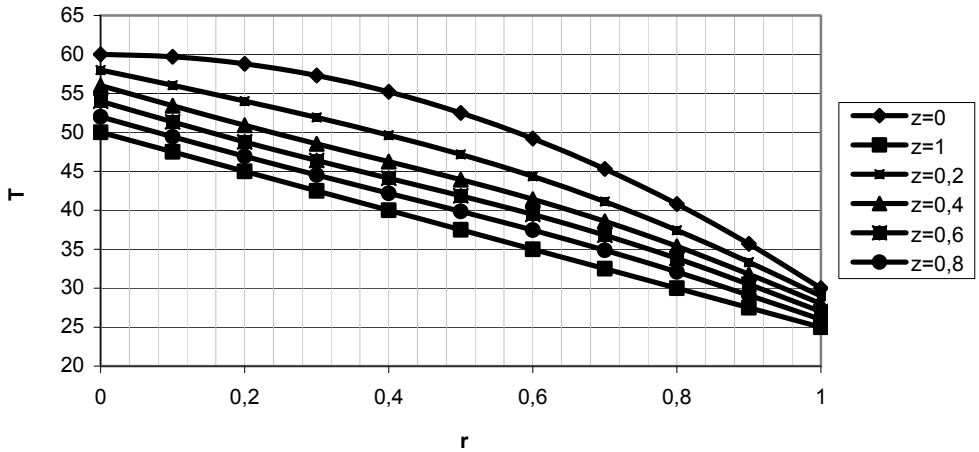


Рис. 4. Просторова розгортка температури в торцевому ущільненні без канавки $T = T(z_\otimes, r)$

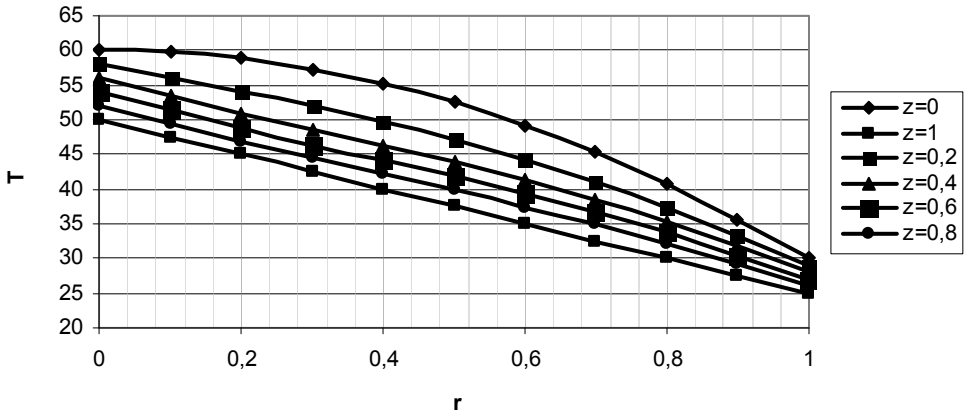


Рис. 5. Просторова розгортка температури в торцевому ущільненні з квадратною канавкою $T = T(z_{\otimes}, r)$

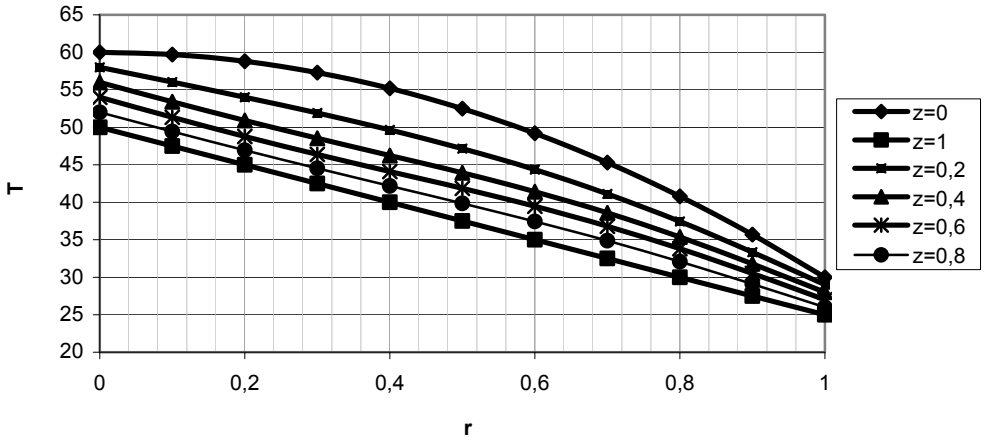


Рис. 6. Просторова розгортка температури в торцевому ущільненні з трикутною канавкою $T = T(z_{\otimes}, r)$

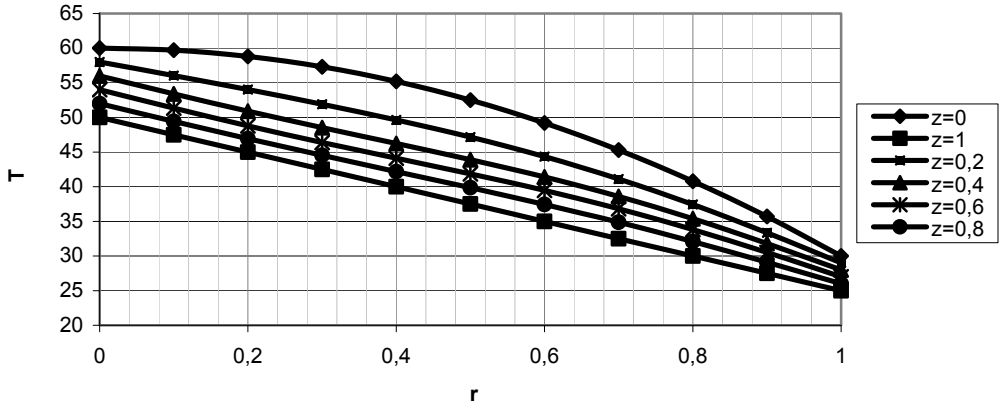


Рис. 7. Просторова розгортка температури в торцевому ущільненні з трапецевидною канавкою $T = T(z_{\otimes}, r)$

Висновки

Результати дослідження розподілу температур для різних форм поперечного перетину обертового кільця у двовимірній постановці у вигляді графічних залежностей (рис. 4…7), показують:

1. Найбільша різниця температур в однойменних точках складає 1,0…3,0 °С.

2. Роботоздатність теплостійкість для торцевих ущільнень з канавкою у вигляді спіралі Архімеда на торці обертового кільця забезпечується.

3. Форма поперечного перетину канавки на торці обертового кільця суттєво не впливає на розподіл температур, що дозволяє виконувати всі інші розрахунки, у тому числі на міцність, за класичними методиками та формулами.

Література

1. Голубев А.И. Торцевые уплотнения вращающихся валов / А.И. Голубев. – М. : Машиностроение, 1974. – 212 с.

2. Орлов П.И. Основы конструирования : справочно-методическое пособие : в 2 кн. Кн.1 / П.И. Орлов. – М. : Машиностроение, 1988. – 560 с.

3. Bhandary V.B. Design of Machine Elements. New Delhi : Tata McGrew-Hill Education Ltd., 2007. – 934 p.

4. Малащенко В.О. Торцеві ущільнення підвищеної герметичності : монографія / В.О. Малащенко, І.О. Похильчук, В.М. Стрілець. – Рівне : НУВГП, 2014. – 128 с.

5. Пат. 108700 Україна, МПК(2006.01) F16 J 15/34. Торцеве ущільнення / О.Р. Стрілець, І.О. Похильчук, В.М. Стрілець, М.М. Козяр, С.В. Мазур ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u №2016 01231, заявл. 12.02.16 ; опубл. 25.07.16, Бюл. № 14.

6. Пат. 108700 Україна, МПК(2006.01) F16 J 15/34. Торцеве ущільнення / І.О. Похильчук, О.Р. Стрілець, М.М. Козяр, В.М. Стрілець, С.В. Мазур ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u №2016 01240, заявл. 12.02.16 ; опубл. 25.07.16, Бюл. № 14.

7. Пат. 112500 Україна, МПК(2006.01) F16 J 15/34. Спосіб виготовлення канавки на торці обертового кільця тертя торцевого ущільнення / О.Р. Стрілець, В.М. Стрілець, М.М. Козяр, І.О. Похильчук, С.В. Мазур ; заявник і власник патенту Національний університет водного господарства та природокористування. – u №2016 04205, заявл. 18.04.2016 ; опубл. 26.12.16, Бюл. № 24.

8. Мазур С.В. Торцеві ущільнення з канавками на торці обертового кільця у вигляді спіралі Архімеда / С.В. Мазур, О.Р. Стрілець, І.О. Похильчук, В.М. Стрілець // Збірка тез Дев'ятої між нар. науково-практ. конф. «ІПРТК – 2016», 17-18 травня 2016 року. – К. : НАУ, 2016. – С. 215–217.

9. Мазур С.В. Спосіб виконання на торці кільця канавки у вигляді спіралі Архімеда / С.В. Мазур, О.Р. Стрілець, В.М. Стрілець // Збірка тез Десятої між нар. науково-практ. конф. «ІІТРК - 2017», 16-17 травня 2017 року. – К. : НАУ, 2017. – С. 182–184.

10. Мазур С.В. Принцип роботи і деякі розрахунки торцевих ущільнень з канавкою Архімеда на торці обертового кільця / С.В. Мазур, О.Р. Стрілець, І.О., В.М. Стрілець, О.Ю. Тимейчук // Матеріали доповідей тринадцятого Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові «МСУІМЛ–13», 18-19 травня 2017 року. – Львів : КІНПАТРІ ЛТД, 2017. – С. 137–138.

11. Галахов М.А. Математические модели контактной гидродинамики / М.А. Галахов, П.Б. Гусятников, А.П. Новіков. – М. : Наука, 1985. – 295 с.

12. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б.Ф. Гликман. – М. : Наука, 1986. – 368 с.

References

1. Holubev A.Y. Tortsevye uplotnenyia vrashchaiushchykhsia valov / A.Y. Holubev. – M. : Mashynostroenye, 1974. – 212 s.

2. Orlov P.Y. Osnovy konstruyrovanyia : spravochno-metodycheskoe posobye : v 2 kn. Kn.1 / P.Y. Orlov. – M. : Mashynostroenye, 1988. – 560 s.

3. Bhandary V.B. Design of Machine Elements. New Delhi : Tata McGrew-Hill Education Ltd., 2007. – 934 p.

4. Malashchenko V.O. Tortsevi ushchilnennia pidvyshchenoi hermetychnosti : monohrafiia / V.O. Malashchenko, I.O. Pokhylchuk, V.M. Strilets. – Rivne : NUVHP, 2014. – 128 s.

5. Pat. 108700 Ukraina, MPK(2006.01) F16 J 15/34. Tortseve ushchilnennia / O.R. Strilets, I.O. Pokhylchuk, V.M. Strilets, M.M. Koziar, S.V. Mazur ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – u #2016 01231, zaiavl. 12.02.16 ; opubl. 25.07.16, Biul. # 14.

6. Pat. 108700 Ukraina, MPK(2006.01) F16 J 15/34. Tortseve ushchilnennia / I.O. Pokhylchuk, O.R. Strilets, M.M. Koziar, V.M. Strilets, S.V. Mazur ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – u #2016 01240, zaiavl. 12.02.16 ; opubl. 25.07.16, Biul. # 14.

7. Pat. 112500 Ukraina, MPK(2006.01) F16 J 15/34. Sposib vyhotovlennia kanavky na tortsi obertovoho kiltsia tertia tortsevoho ushchilnennia / O.R. Strilets, V.M. Strilets, M.M. Koziar, I.O. Pokhylchuk, S.V. Mazur ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. – u #2016 04205, zaiavl. 18.04.2016 ; opubl. 26.12.16, Biul. # 24.

8. Mazur S.V. Tortsevi ushchilnennia z kanavkamy na tortsi obertovoho kiltsia u vyhliadi spirali Arkhimeda / S.V. Mazur, O.R. Strilets, I.O. Pokhylchuk, V.M. Strilets // Zbirka tez Deviatoi mizh nar. naukovo-prakt. konf. «IIRTK – 2016», 17-18 travnia 2016 roku. – K. : NAU, 2016. – S. 215–217.

9. Mazur S.V. Sposib vykonannia na tortsi kiltsia kanavky u vyhliadi spirali Arkhimeda / S.V. Mazur, O.R. Strilets, V.M. Strilets // Zbirka tez Desiatoi mizh nar. naukovo-prakt. konf. «IITRK - 2017», 16-17 travnia 2017 roku. – K. : NAU, 2017. – S. 182–184.

10. Mazur S.V. Pryntsyp roboty i deiaki rozrakhunky tortsevykh ushchilnen z kanavkoiu Arkhimeda na tortsi obertovoho kiltsia / S.V. Mazur, O.R. Strilets, I.O., V.M. Strilets, O.Yu. Tymeichuk // Materialy dopovidei trynadtsiatoho Mizhnarodnoho sympoziumu ukrainskykh inzheneriv-mekhanikiv u Lvovi «MSUIML–13», 18-19 travnia 2017 roku. – Lviv : KINPATRI LTD, 2017. – S. 137–138.

11. Halakhov M.A. Matematycheskye modely kontaktnoi hydrodynamyky / M.A. Halakhov, P.B. Husiatnykov, A.P. Novikov. – M. : Nauka, 1985. – 295 s.

12. Hlykman B.F. Matematycheskye modely pnevmohydravlycheskykh system / B.F. Hlykman. – M. : Nauka, 1986. – 368 s.

Рецензія/Peer review : 12.06.2017 р. Надрукована/Printed : 12.06.2017 р.
Рецензент: д. т. н., проф. Кравець С. В.

УДК 637.5.02

О.В. БАТРАЧЕНКО
Черкаський державний технологічний університет

МЕТОДОЛОГІЧНА КОНЦЕПЦІЯ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В МАШИНОБУДУВАННІ

Розроблено методологічну концепцію вдосконалення технічних систем машинобудівної галузі, зокрема обладнання харчових виробництв. На сьогоднішній день існує значна кількість методик та положень, які дозволяють формалізувати пошук рішень задач, які виникають при

вдосконаленні техніки. Однак ці методики громіздкі та достатньо вузько спеціалізовані. Для фахівця, який працює в одній галузі техніки, частина понятійного апарату відомих методик є незатребуваною. Все це ускладнює роботу із вдосконалення техніки, робить її менш ефективною. В статті пропонується методологічна концепція, яка дозволяє швидко та чітко з'ясувати цілі вдосконалення технічних систем, ті перешкоди, які заважають такому вдосконаленню та найбільш прогресивні шляхи розвитку техніки. Концепція визначає засоби, якими ці шляхи реалізуються найбільш ефективно у тих випадках, які найчастіше зустрічаються в машинобудуванні.

Ключові слова: технічні системи, розвиток, вдосконалення, методологія, концепція.

OLEXANDR VICTOROVICH BATRACHENKO
Cherkassy State Technological University

THE METHODOLOGICAL CONCEPT OF DEVELOPMENT OF TECHNICAL SYSTEMS IN ENGINEERING

Developed methodological concept for the improvement of technical systems in engineering industry, in particular equipment for food production. Today, there are a significant number of methods and provisions that allow us to formalize the search for solutions to problems arising in the improvement of technique. However, these methods are cumbersome and quite narrowly specialized. For the specialist, who works in one branch of engineering, part of the conceptual apparatus known techniques is unclaimed. All this complicates the work on improving the technique, making it less effective. The paper proposes a methodological concept that allows you to quickly and clearly identify the purpose of improving the technical systems, the obstacles that hinder such improvement and the most progressive ways of development of technology. The concept identifies the means by which these pathways are realized most effectively in the cases that are most often found in mechanical engineering.

Key words: technical systems, development, improvement, methodology, concept.

Постановка проблеми

Розвиток техніки, її вдосконалення та поліпшення – це процес безупинного вирішення задачі переведення економіки на новий рівень технології, а суспільства – на нову щабель технічного прогресу. Так розв’язуються технічні суперечності, інтенсифікуються режими роботи відомих видів обладнання, з’являються види техніки, які засновані на нових фізичних принципах, впроваджуються прогресивні технології, знаходяться шляхи енерго- та ресурсозбереження, застосовуються нові види матеріалів, сучасні системи керування і типи приводів, системи технічного зору та штучного інтелекту і багато іншого.

В сучасних умовах розвиненого технічного прогресу та конкурентної ринкової економіки не лише процеси проектування, конструювання та впровадження у виробництво нових виробів повинні відбуватись з високим ступенем динамічності, але й народження самих ідей, що лежать в основі нових виробів, також повинно відбуватись із максимальною продуктивністю.

На сьогоднішній день існує значна кількість методик та положень, які дозволяють формалізувати пошук рішень задач, що виникають при вдосконаленні техніки, а також зробити цю діяльність більш продуктивною [1]. Однак при їх практичному використанні стають наочними і їх недоліки, найголовнішими з яких є громіздкість та достатньо вузька спеціалізація. Так одні з них призначені для пошуку нового рішення конкретної технічної задачі, інші – для знаходження і постановки самих невирішених задач, треті - окреслюють і деталізують вимоги, що ставляться до техніки. При цьому більшість з методик містить значний обсяг понятійного матеріалу, який дозволяє використовувати окремо взяту методику для вирішення широкого кола задач із різних галузей техніки.

Для фахівця (інженера, науковця), який працює в одній галузі техніки, частина понятійного апарату методик є незатребуваною, практично не застосовною, а значить зайвою, тою, яка відтягує на себе частину пам'яті та уваги фахівця, збільшує витрати часу на аналіз задачі та пошук її вирішення. З цієї точки зору, відповідно до положень функціонально-вартісного аналізу, такі частини понятійного матеріалу можна вважати шкідливими, тими, що потребують видалення.

Поряд із означеним вище, слід вказати на віддаленість, відірваність методик поміж собою, відсутність чіткого та логічного зв'язку між ними. Це призводить до необхідності фахівцю при вирішенні задач самотужки визначати потребу в методиках певної групи, виконувати їх пошук, вивчення, а потім узагальнення та систематизацію. Іншими словами фахівцеві необхідно самостійно випрацьовувати концепцію своєї роботи при вдосконаленні техніки, що знижує продуктивність та результативність його діяльності.

Особливо наочно видно недоліки відомих методик при навчанні ним слухачів, зокрема студентів. Так досвід викладання дисципліни "Теорія технічних систем", керування дипломним проектуванням та

студентською науковою роботою під час підготовки студентів за спеціальністю "Галузеве машинобудування" дозволяє зробити наступні висновки. Слухачам в багатьох випадках достатньо складно ґрунтовно опанувати всі основні спеціалізовані методики та положення розвитку технічних систем. Ця складність обумовлена, знову ж таки, великим понятійним апаратом даних методик, а також його значною відмінністю від класичних фахових технічних дисциплін, таких як "Теоретична механіка", "Деталі машин", "Технологічне обладнання галузі" тощо. Додатковим чинником, що суттєво ускладнює опанування матеріалу, є мала кількість аудиторних годин, які найчастіше передбачені навчальними планами для дисципліни "Теорія технічних систем".

Враховуючи вищеозначене, актуальним є створення такого понятійного апарату, який би дозволяв з'ясувати основні напрямки, принципи та саму логіку розвитку технічних систем, робити це якісно та в короткі терміни. Такий понятійний апарат має стати принципами, постулатами або, що точніше, концепцією роботи фахівця з розвитку технічних систем в машинобудуванні, бути мов би "призмою" крізь яку фахівець повинен дивитись на техніку навколо себе.

Нижче наведено відповідну концепцію, в якій автор виконав спробу вирішити це завдання. Представлена концепція адаптована, насамперед, для технологічного обладнання, зокрема, харчових виробництв.

Аналіз останніх джерел

В роботі [2] представлено детальний перелік вимог до технічних систем. Однак він охоплює системи різних класів, таких як верстатне обладнання, теплосилове устаткування, авіатехніку, транспорт тощо. Для технологічного обладнання ці вимоги можуть бути звужені та концентровані між собою.

Основні напрямки модернізації обладнання харчових виробництв наведені в роботі [3]. В ній представлено 12 напрямків, які достатньо детально окреслюють завдання при вдосконаленні технічних систем харчових виробництв. Однак, на думку автора, така кількість напрямків є завеликою в контексті поставленої задачі та в них відсутні достатньо цінні положення, що наведені в [2]. Доцільно звузити дані напрямки та зробити їх більш ємнісними та лаконічними.

Автори [4] представили численні експериментальні дані про вплив середовищ харчових виробництв на надійність та довговічність елементів технологічного обладнання. Ці дані доцільно враховувати в розроблюваній концепції.

Проводити ефективний пошук резервів вдосконалення технічної системи та зниження її собівартості дозволяє функціонально-вартісний аналіз (ФВА) [5]. Важливою з практичної точки зору особливістю ФВА є розгляд об'єкту, як сукупності функцій, які він виконує. При цьому передбачається, що кожному об'єктові, найчастіше, властиві корисні, нейтральні та шкідливі функції різного рівня виконання, які можуть дублюватись в об'єкті. Відповідно до ФВА, порівнюється функціональна значущість кожного елемента (навіть окремих поверхонь однієї деталі) та вартість на його виготовлення. Передбачається, що в багатьох випадках витрати є завеликими по відношенню до значущості тих функцій, які об'єкт виконує. Кінцевою метою ФВА є виключення шкідливих, нейтральних та дубльованих функцій разом з їх матеріальними носіями – елементами. Завдяки цьому можна підвищити ефективність роботи системи, спростити та здешевити її або одночасно досягти означених результатів. Не дивлячись на цілком певні переваги даного методу, його недоліками в даному випадку слід вважати громіздкість та, що більш важливо, відсутність потреби у вартісному аналізі розглядуваних технічних систем. Найбільш затребуваним та ефективним інструментом ФВА є функціональний аналіз системи та її елементів. Його і доцільно взяти до уваги у розроблюваній концепції.

На думку автора, пошук нових рішень складних технічних задач найбільш ефективно здійснювати за допомогою теорії вирішення винахідницьких задач ТВВЗ (рос. – ТРИЗ) [6]. Базовими її засадами є поняття "ідеального кінцевого результату" та технічного протиріччя. Ідеальний кінцевий результат - це, найчастіше, недосяжна для стовідсоткового виконання мета, але він є закономірним результатом розвитку будь-якої технічної системи. Орієнтуючись на нього можна одразу виходити на найбільш ефективні та прогресивні рішення при вдосконаленні технічних систем. Технічне протиріччя – це той випадок, коли до одного і того ж елемента висуваються протилежні вимоги. В основі технічних протиріч лежать протиріччя фізичні: "Для якісного виконання функції А об'єкт повинен бути дуже гарячим, а для якісного виконання функції Б об'єкт повинен бути дуже холодним". Теорія вирішення винахідницьких задач вчить саме розв'язувати технічне протиріччя, а не йти на компромісне рішення задачі. Розв'язку технічного протиріччя сприяє використання законів розвитку технічних систем, типові прийоми усунення технічних протиріч, алгоритм вирішення винахідницьких задач, стандартні рішення винахідницьких задач, збірник фізичних ефектів. З точки зору автора, найбільш широковживаним,ефективним та лаконічним інструментарієм ТВВЗ є положення законів розвитку технічних систем, деякі типові прийоми та стандартні рішення, які стосуються об'єднання технічних систем. Багато типових прийомів, таких як, принцип копіювання, використання пневмо- і гідроконструкцій, зміни забарвлення, застосування сильних окислювачів тощо дуже рідко застосовуються в машинобудуванні, зокрема при для обладнання харчових виробництв. В той же час фізичні ефекти достатньо широко представлені в обладнанні харчових виробництв, завдяки чому інженери та науковці, найчастіше, ознайомлені з випадками їх ефективного використання. Все означене дозволяє вибрати найбільш ефективний інструментарій ТВВЗ для розроблюваної концепції розвитку технічних систем.

При вдосконаленні технічних систем високою ефективністю володіє метод, який істотно відрізняється від тих, що були розглянуті вище. Це метод, який базується на використанні результатів наукових досліджень. Автор вважає, що істотного покращення показників технічної системи можна досягти, якщо розв’язати існуючі в ній складні технічні протиріччя. Проте найчастіше простоювання у розв’язку таких протиріч відбувається не через відсутність спроб їх вирішення, а через відсутність нових знань, які б дозволили більш глибоко та вірно зрозуміти причини виникнення задачі та виявити нові залежності між її параметрами. Утворення таких знань відбувається саме в результаті наукових досліджень процесів та явищ, що супроводжують роботу технічної системи. Таким чином проведення наукових досліджень дозволяє отримати врешті такі результати, що сприяють вирішенню найскладніших технічних задач. На жаль, в переважній більшості технічної літератури конструкторського та винахідницького спрямування даному методу приділяється недостатня увага, що суттєво обмежує можливість пошуку ефективних рішень. Наукові дослідження можуть бути різного виду та спрямування, однак, в контексті задачі вдосконалення технічних систем найчастіше достатньо проведення прикладних наукових досліджень або, навіть, їх елементів.

Нижче наведено розроблену концепцію розвитку технічних систем в машинобудуванні та деякі

приклади її використання.

Метою роботи є розробка методологічної концепції розвитку технічних систем машинобудівної галузі, зокрема обладнання харчових виробництв, яка повинна дозволяти швидко та чітко з'ясувати цілі вдосконалення технічних систем, ті перешкоди, які заважають такому вдосконаленню, найбільш прогресивні шляхи вирішення задач та засоби, якими ці шляхи реалізуються найбільш ефективно.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до [7], концепція (від лат. conceptio — «розуміння», «система») – це певний спосіб розуміння і трактування явищ, основна точка зору, керівна ідея, система поглядів на явища, провідний задум, комплекс поглядів, пов'язаних між собою і які витікають один з іншого, система шляхів вирішення завдання тощо. Автор вважає обґрунтованим використовувати саме термін "концепція" для розроблених положень, оскільки даний термін є більш цілісним та системним в порівнянні з тезисами, постулатами та принципами [7], які являють собою простий набір понять, що необов'язково пов'язані між собою.

На основі власного досвіду з розвитку технічних систем, що знайшло відображення у 57 отриманих патентів України на корисну модель (№ 19348, 17299, 22232, 27134, 27136, 27135, 31369, 31370, 31558, 32983, 32981, 32982, 37171, 34534, 34390, 34504, 39792, 39838, 39791, 41262, 41545, 44101, 44276, 50688, 50253, 50074, 50116, 50078, 51556, 51557, 60859, 60861, 60860, 60862, 60868, 60044, 60045, 60863, 61245, 60858, 60857, 61682, 61683, 65332, 66843, 71901, 71902, 71903, 71900, 78330, 83391, 83944, 88059, 88060, 88061, 101661, 104778), автор пропонує методологічну концепцію розвитку технічних систем в машинобудуванні. Її структура представлена на рис. 1, а детальне викладення – нижче у тексті. Концепція містить 4 понятійні блоки, послідовне слідування яким дозволяє визначити вимоги до сучасних технічних систем, причини виникнення проблемних задач при їх вдосконаленні, а також шляхи та інструментарій вирішення цих задач. Автор намагався використовувати достатньо просте стилістичне формулювання положень концепції з метою спрощення її засвоювання і запам'ятовування, а також з метою акцентування уваги фахівців саме на сутності висунутих положень (кроків при вирішенні задачі).

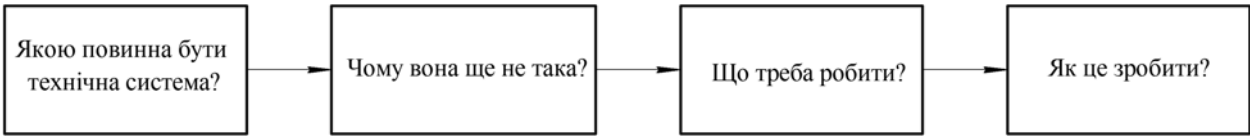


Рис. 1. Структурна схема методологічної концепції розвитку технічних систем в машинобудуванні

Якою повинна бути технічна система?

- Технічна система призначена для виконання саме головної корисної функції;
- При цьому система повинна її виконувати якомога швидше, якісніше, зручніше, безпечніше, з найменшою участю людини.
- Працювати система повинна якомога більше років, з максимальним ступенем використання та мінімальною кількістю ремонтів, які повинні бути дешевими.

Чому вона ще не така?

- Через не дуже раціональні принцип дії, конструктивні схеми елементів, марки матеріалів та методи обробки цих елементів.
- Нераціональними вони є тому, що поряд із головною корисною функцією та допоміжними корисними в кожному елементі найчастіше присутні нейтральні та навіть шкідливі функції, а наявні корисні можуть дублюватись, мати недостатній або надлишковий рівень виконання, що потребує виправлення.
- В основі складних задач лежать технічні протиріччя, що виникають через системні взаємозв'язки елементів.
- Найскладніші задачі не вирішуються тому, що існуючих знань про розглядуваний процес недостатньо, процес насправді відбувається дещо інакше, а тому звичні конструктивні рішення і не можуть бути ефективними.

Що треба робити?

- Рухатись завжди потрібно в напрямку підвищення "ідеальності" технічної системи, тобто щоб виконання головної корисної функції здійснювалось з найменшими витратами матеріалу, енергії, часу та коштів.
- Для цього при вирішенні задач слід намагатись використовувати вже наявні в технічній системі конструктивні елементи, силові поля та резерви часу.
- Шкідливі фактори слід усувати, нейтралізуючи їх іншими шкідливими факторами або посилюючи до такого стану, коли вони перестають бути шкідливими.

Як це зробити?

- Слід детально з'ясувати функціональне призначення та умови роботи розглядуваних елементів.
- В складних випадках для цього потрібно встановити нові знання про розглядуваний процес за допомогою наукових досліджень.
- Все це дає можливість глибоко проаналізувати наявні технічні протиріччя, зрозуміти їх справжню суть та вирішити їх.

- Вирішення досягається розділенням суперечливих вимог у просторі і часі.
- Для цього доцільно виконувати такі дії:
- Відокремити від елемента саме необхідну його властивість, корисну або шкідливу, зробити ступінь відокремлення максимально локальним.
- Передати функції елемента іншим або видалити їх разом із елементами-носіями.
- Розділити елемент на окремі частини або зони.
- Кожній зоні потрібно створити найкращі умови її роботи.
- Динамізувати (зробити рухомими) елементи чи їх частини, динамізувати силові поля в системі для кращої її адаптації до умов роботи.
- Якщо система вже динамізована, уважно проаналізувати і підвищити ступінь динамічності.
- Окремі рухомі елементи обладнати індивідуальними приводами.
- Максимально узгодити роботу окремих елементів та приводів між собою за режимами і за часом.
- Для цього робота приводів повинна підпорядковуватись єдиній програмованій системі керування.
- Система керування може мати розвинений комплекс датчиків і бути саморегульованою.
- Для високої питомої продуктивності системи важливим є правильне узгодження процесів подачі сировини та її обробки.
- Підвищення продуктивності можна досягти шляхом об'єднання у часі кількох дій в системі та забезпеченням безперервності корисної дії, коли паузи в одній дії заповнюються іншою дією.
- Значного підвищення ефективності технічної системи можна досягти шляхом об'єднання кількох однакових або різних систем у бі- та полі-системи, при цьому збільшується діапазон виконуваних операцій, підвищується продуктивність, зменшується кількість складових елементів та спрощується конструкція, яка стає більш компактною.
- Компактність конструкції підвищується, якщо елементи проходять один крізь іншого або розташовуються один всередині іншого.
- Найбільшої ефективності системи можна досягти, якщо перевести її принцип дії на "мікрорівень".
- З точки зору довговічності система може бути дешева, але найбільш відповідальні та напружені вузли повинні бути добротними, дуже надійними, оскільки збитки від ремонтів та простоювання технічної системи при експлуатації значно перевищують вартість добротних вузлів.
- При обробці сировина впливає на робочі органи, визначаючи їх довговічність, при цьому хімічна дія сировини значно посилює їх зношування, а корозійна зменшує їх втомну міцність.
- Після вирішення проблеми А слід уважно проаналізувати впроваджені конструктивні зміни, оскільки вони дозволяють попутно вирішити також і проблеми Б, В...
- Знайшовши рішення проблеми, потрібно визначити в яких інших технічних системах воно може бути застосоване і для яких задач.

Достатньо наочним прикладом вдосконалення технічної системи шляхом розв'язання технічного протиріччя на основі аналізу функціонального призначення її елементів може бути розробка нової будови решітки м'ясорізального вовчка [пат. № 39838]. Робочий процес подрібнення сировини в решітці можна поділити на три основні етапи: втискування сировини в отвори, різання парою «ніж-решітка», проштовхування сировини всередині отворів. Кожний з цих етапів обумовлює свої особливі вимоги до конструкції решітки та її отворів. Для циліндричних перпендикулярних отворів (рис. 2, а) спостерігається гарне втискування сировини в отвори, але погане різання внаслідок кута різання 90º у різальної кромки 3 отвору. Для циліндричних похилих отворів (рис. 2, б) властиве гарне різання (кут різання <90º), але погане проштовхування всередині отворів, такі отвори неможливо використовувати для проміжної решітки через кут різання на протилежному торці >90º. Конічні перпендикулярні отвори (рис. 2, в) характеризуються гарним різанням та проштовхуванням сировини крізь отвори, але поганим її втискуванням в отвори.

Проведений функціонально-вартісний аналіз дозволив встановити, що тильна сторона 2 отвору виконує такі функції: транспортування сировини, забезпечення міцності та жорсткості решітки, створення припуску на перезаточування тощо. Робоча ж сторона 3 отвору виконує дещо інші функції: різання, транспортування сировини, забезпечення міцності та жорсткості решітки, створення припуску на перезаточування тощо. Можна дійти висновку, що вимога розташування під гострим кутом до торцю відноситься саме до сторони 3, як такої, що виконує процес різання сировини. Більше того дана вимога стосується лише невеликої початкової ділянки 6 цієї сторони, де саме і відбувається процес різання. Інші ділянки сторони 3, а також сторона 2 не обов'язково повинні бути розташовані під гострим кутом до торцю решітки, а з огляду на легке вдавлювання та проштовхування сировини, можна дійти висновку, що ці ділянки повинні бути розташовані під прямим кутом. В результаті розроблено збірну решітку вовчка зі змінними пластинами, в якій найкращим чином поєднано кілька суперечливих вимог.

Прикладом виділення в об'єкті окремих зон та створення для них найліпших умов роботи є вдосконалення перфорованих ножів кутера (рис. 3). Такі ножі застосовуються для кращого емульгування фаршів варених ковбас, кромки отворів при цьому виконують додаткове подрібнення сировини. Визначено [8], що ефективність роботи отворів, які розташовані біля посадочної частини ножа, недостатня внаслідок

руху цієї ділянки з мінімальною лінійною швидкістю V_{min} (мінімальна швидкість різання) у верхній частині чаші кутера, яка не завжди заповнена сировиною. В той же час, отвори біля посадочної частини ножа значно зменшують його міцність, оскільки вони розташовані в найбільш напруженій його частині (рис. 3, а). Автором розроблено вдосконалену конструкцію перфорованого ножа [пат. № 66843], отвори якого розташовано на периферії корпусу (рис. 3, б). Міцність ножа вдосконаленої конструкції в найбільш напруженій його ділянці стала вища на 20%. Одночасно з цим покращено подрібнювальну здатність ножа за рахунок більш вигідного розташування отворів – вони рухаються в тій частині чаші, яка завжди завантажена сировиною, при чому рухаються з найбільшими лінійними швидкостями V_{max}.

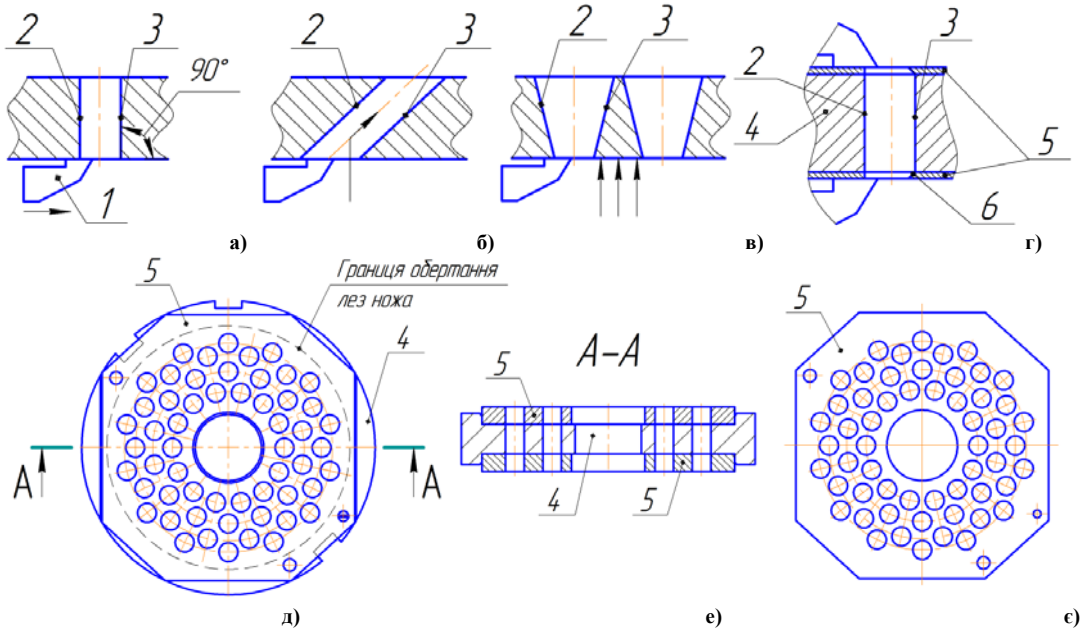


Рис. 2. Схема до пояснення вдосконаленої конструкції решітки вовчка: 1 - ніж; 2 - тильна сторона отвору; 3 - робоча сторона отвору; 4 - корпус решітки; 5 - змінні пластини; 6 - похила робоча сторона отвору пластини.

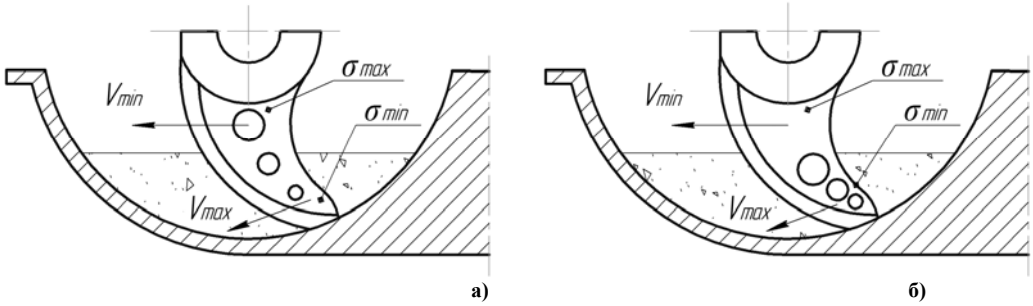
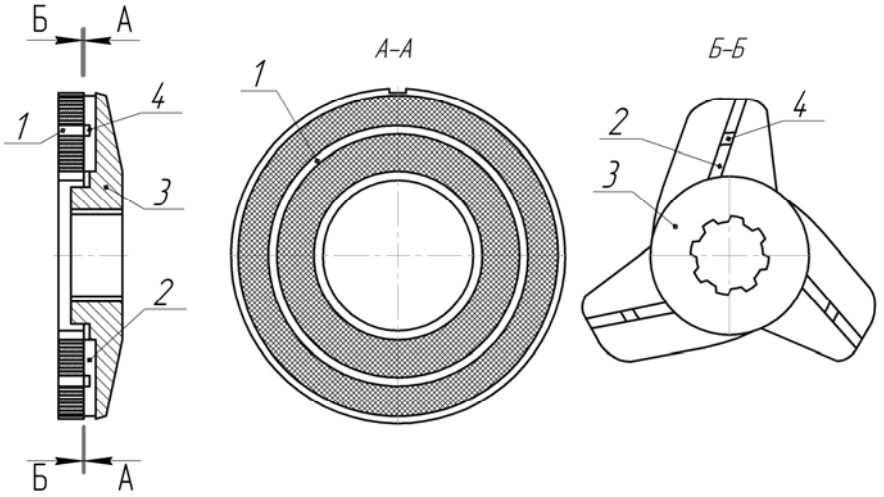


Рис. 3. Схеми роботи перфорованих ножів кутера: а) звичайного; б) вдосконаленого.

Вдосконалення різального механізму емульситаторів [9] є прикладом комплексного застосування функціонального аналізу, розділення вимог щодо різних частин об'єкту та застосування наукових положень теорії опору матеріалу (рис. 4).

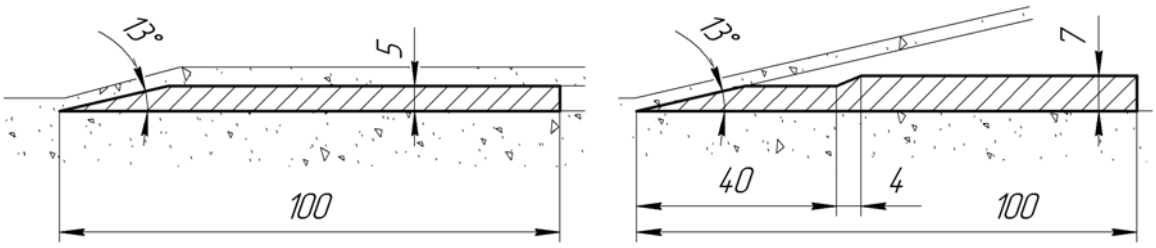
Одним з суттєвих недоліків емульситаторів є надмірний нагрів фаршу у різальному вузлі внаслідок тертя ножів по решіткам з частотою 50 $с^{-1}$. Решітки звичайної конструкції мають суцільні радіальні ребра жорсткості, які суттєво збільшують площу тертя та, як наслідок, емісію тепла у фарш. Ефективним шляхом зменшення нагріву фаршу може бути зменшення площі контакту ножа з перфорованою решіткою. В якості резерву зменшення вказаної площі доцільно розглядати саме радіальні ребра жорсткості. При цьому виникає наступне технічне протиріччя: „Ребра жорсткості повинні бути наявні для забезпечення високої міцності решітки і ребра жорсткості повинні бути відсутні, щоб не збільшувати нагрів фаршу при подрібненні”. В результаті аналізу було встановлено, що контакт ножа з решіткою є обов'язковим лише в зонах різання, над отворами, а там де отворів немає контакт є непотрібним і навіть шкідливим. В результаті розроблено нову конструкцію різального механізму (рис. 4) – замість радіальних ребер жорсткості застосовано кільце жорсткості 1, а леза 2 ножа 3 мають пази 4, які розташовані понад кільцем жорсткості 1. Завдяки цьому елемент жорсткості наявний (кільце 3), але з процесу тертя цей елемент виключено (за рахунок застосування пазів 4). Більш того, у відповідності з науковими основами теорії опору матеріалів міцність такої решітки підвищено на 36%, оскільки кільце жорсткості працює переважно на розтягування, а радіальні ребра – на згинання. Площа тертя такого різального механізму стала меншою на 25% при одночасному підвищенні довговічності решіток.



а) б) в)

Рис. 4. Різальний механізм емульситатора вдосконаленої будови: а) різальний механізм; б) решітка; в) ніж

Прикладом застосування наукових досліджень для створення передумов подальшого розвитку техніки є вдосконалення конструкції ножів кутера. Для ножів відомим є наступне технічне протиріччя: "Ніж повинен бути якнайтоншим для мінімізації нагріву фаршу при подрібненні та ніж повинен бути якнайтовщим для забезпечення його високої міцності". Нагрів фаршу спричинює погіршення кості ковбас, а руйнування ножа при обертанні обумовлює суттєві комплексні збитки для м'ясопереробного підприємства. В результаті досліджень гідродинаміки сировини при кутеруванні встановлено [10], що, на відміну від відомих уявлень (рис. 5, а), при обтіканні верхньої частини профілю ножа потік сировини після руху по заточці леза огинає верхню горизонтальну сторону ножа, не контактуючи з нею (рис. 5, б). Встановлені нові знання дозволили запропонувати [пат. № 71901] новий шлях підвищення міцності ножів – диференційоване підвищення їх товщини (рис. 5, б). При цьому забезпечується одночасне виконання двох наведених вище вимог – малий нагрів сировини (за рахунок малої товщини леза в зоні контакту із сировиною) та до 2,2 разів вища міцність ножа (за рахунок збільшеної товщини в задній, найбільш напруженій, частині ножа, яка не контактує із сировиною).



а) б)

Рис. 5. Схеми обтікання сировиною та поперечні перерізи ножів кутера: а) стандартного; б) вдосконаленого

Приклади використання впроваджених конструктивних змін для попутного вирішення інших задач, які початково не ставились, наведені нижче. Збірна конструкція решітки зі змінними пластинами (рис. 2, д-є), дозволяє виготовляти корпус 4 з більш дешевої, конструкційної, сталі і використовувати його на протязі тривалого часу, а змінні пластини 5 можуть виготовлятись із дорогокоштуваних зносостійких сплавів. При цьому мала товщина змінних пластин 5 та багатогранна їх форма з прямими ділянками підвищує технологічність їх виготовлення. Також стає можливим покращити умови різання одночасно з обох торців решітки, що є актуальним для проміжних решіток (рис. 2, г). Таким чином, при вирішенні задачі про конфігурацію отворів була вирішена дана задача та попутно ще 3 додаткові задачі.

Широко відома конструкція м'ясорізальних вовчків (рис. 6, а), в якій передбачено роздільний привод робочого шнеку 1 та ножового валу 2. Ножі 5 обертаються швидше за робочий шнек 1, чим досягаються більш сприятливі умови для подачі сировини крізь різальний комплект та, відповідно, вища питома продуктивність вовчка. Але така кінематична схема дозволяє [пат. № 50253] більш ефективно реалізувати роботу вовчка-мішалки (рис. 6, б). При обертанні змішувальних валів 7 і 8 в режимі перемішування сировина зсувається ними в напрямку від завантажувального вікна шнеку. При роботі вовчка в режимі подрібнення напрямок обертання двигуна приводу 9 змінюється і таким чином змішувальні вали подають сировину до завантажувального вікна робочого шнеку. Сам робочий шнек при змішуванні обертається відповідно у режимі реверсу, чим забезпечує достатньо надійне перешкоджання витіканню сировини з бункера при перемішуванні.

Згідно розробленої методологічної концепції, наступним кроком по розвитку технічної системи „Вовчок” в даному випадку має бути зміна методу його використання. Кінематична схема, що наведена на рис. 6,б, дозволяє зменшити тривалість підготовчих операцій. Можливість ввімкнення ножового валу 2 з

деяким запізненням по відношенню до початку обертання робочого шнеку 1 дозволяє забезпечити умови, при яких м'ясна сировина спочатку буде подана до різального комплекту, а потім ножі почнуть обертатись. Цим самим забезпечується змащування різального комплекту перед початком його роботи. Необхідність виконання ручного змащування в такому разі відпадає. Ще однією зміною способу експлуатації вовчка є можливість варіювання частотою обертання ножів по відношенню до шнеку, тобто можливість змінювати ступінь подрібнення сировини без зміни решіток різального вузла.

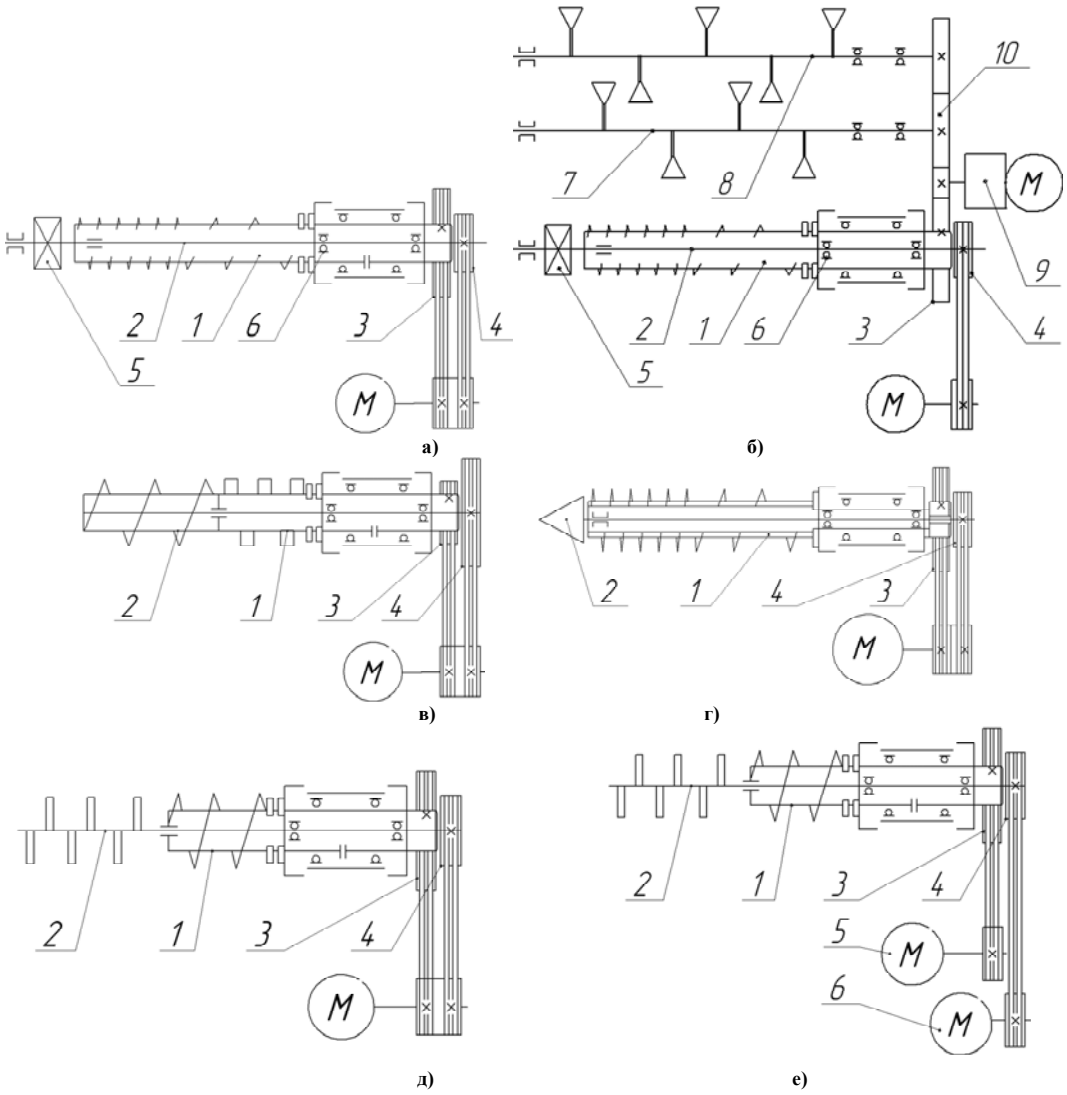


Рис. 6. Приклади розвитку отриманого рішення задачі та застосування його для вирішення аналогічних, задач, кінематичні схеми: а) м'ясорізального вовчка; б) вовчка-мішалки; в) фризера для приготування морозива; г) зернового екструдера; д, е) тістомісильної машини безперервної дії

Далі перевіряємо можливість застосування знайденого технічного рішення до вирішення інших задач. Згідно розробленої методологічної концепції, будь який робочий процес має або різні етапи свого проходження або здійснюється по-різному в різних ділянках робочої частини машини або апарату. Машини, робочий орган яких являє собою подовжений обертовий вал тієї чи іншої будови, широко розповсюджені в різних галузях харчової промисловості. Відповідно технічна можливість забезпечити оптимальні умови проходження робочого процесу в різних зонах такого валу заздалегідь обіцяє отримання певних переваг.

Проведений аналіз дозволив встановити, що відомим конструкціям фризерів властивий такий недолік, як недостатньо високе значення показника збитості морозива. Причиною є те, що перемішування розчиненого у молочній суміші повітря проводиться по всій довжині циліндра при недостатньо високій швидкості обертання перемішуючих робочих органів. При цьому перемішування та роздрібнення бульбашок повітря відбувається в суміші, яка має значну густину та замерзає під час перемішування в циліндрі фризера. Це призводить до погіршення якості морозива та до зменшення його виходу. У вдосконаленій конструкції фризеру [пат. № 71900] реалізовано роздільний привод 3, 4 окремих співвісних 1 і 2 мішалки (рис. 6, в). За рахунок цього ділянка 1 мішалки, яка знаходиться в зоні завантажувального вікна робочого циліндру, обертається з підвищеною частотою. Завдяки цьому аерація молочної суміші проводиться при її рідкому стані, причому з високою інтенсивністю.

Аналогічним чином вдосконалено [пат. № 60044] конструкцію зернових екструдерів (рис. 6, г).

Роздільний привод 3, 4 дозволяє реалізувати швидке обертання наконечнику 2 по відношенню до пресувального шнеку 1, чим інтенсифікується нагрів сировини без погіршення продуктивності та без переналагодження екструдера. Застосування роздільного приводу окремих частин одного ротора актуальне і для тістомісильних машин безперервної дії (рис. 6, д). Використання [пат. № 83944] роздільного приводу 3, 4 змішувального шнеку 1 та пластифікуючих пальців 2 дозволяє реалізувати оптимальні умови для проходження окремих стадій процесу замішування тіста (пластифікація тіста відбувається при підвищеній частоті обертання лопатей). Однак, і дану схему можна розвити. Застосування окремих приводів 5 і 6 (рис. 6, е) для обертання змішувального шнеку 1 та пластифікуючих пальців 2 дозволяє ефективно змінювати параметри процесу замісу для тіста різних видів і рецептурного складу. Так само можна поліпшити і роботу екструдерів [пат. № 104778].

Нижче наведено ще два приклади перенесення отриманого технічного рішення для вирішення інших задач. Відомо, що ножі кутера деяких виробників встановлюються (рис. 7, а) безпосередньо на ножовий вал 3. При цьому посадочна частина 2 ножа має хвостовик 4, який призначений для регулювання робочого зазору між лезом 1 ножа та чашею 5 кутера. Після заточування ножа його габарит зменшується, через що збільшується величина робочого зазору δ між ножем та чашею кутера. Задля забезпечення оптимальних умов тонкого подрібнення сировини передбачено можливість компенсації величини зазору δ: кінець хвостовика 4 зішліфовується, внаслідок чого ніж при розміщені на ножовому валу 3 розташовується ближче до поверхні чаші, чим і компенсується збільшення зазору δ.

Цей же принцип покладено в основу технічного рішення по вдосконаленню молоткової дробарки (рис. 7, б). Під час роботи дробарки поверхня молотків підлягає інтенсивному зношуванню. При цьому зменшується не лише їх ширина, а й їх довжина, внаслідок чого зменшується радіус обертання молотка $R_{об}$ та, відповідно, збільшується зазор l між решіткою 1 та молотками 2. При подрібненні кісткової жировмісної сировини таке збільшення зазору суттєво погіршує умови очищення решітки обертовими молотками, через що продуктивність процесу подрібнення знижується або він зовсім припиняється. Запропоновано [пат. № 78330] на вісі 3 встановлювати фасонні втулки 4, а посадочні отвори 5 молотків виконати відповідної конфігурації та застосувати у складі молотка хвостовик 6 (рис. 7, в). Це дозволяє під час експлуатації витримувати задане значення зазору l. Отримане технічне рішення можна розвити. З метою спрощення налагоджувальних робіт та усунення необхідності використовувати додаткове оснащення для зішліфовування хвостовика 6, молотки слід виконати такими, як на рис. 7, г. В такому разі при налагодженні дробарки необхідно відкрутити гвинти 7 та зняти упори 8, молотки при цьому займуть необхідне положення.

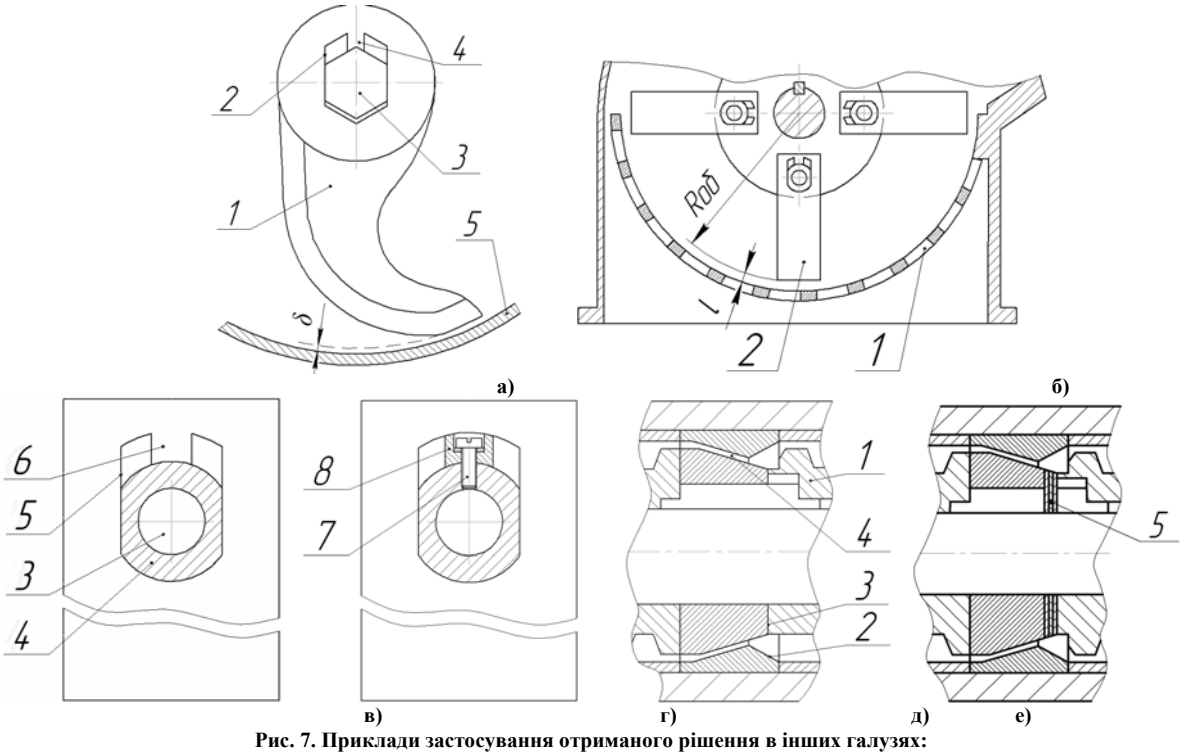


Рис. 7. Приклади застосування отриманого рішення в інших галузях:
а) ніж куттера; б) схема молоткової дробарки; в, г) молотки дробарки; д, е) вузол для нагрівання сировини в екструдері

Такий саме принцип можна застосувати для розвитку іншого виду обладнання – зернових екструдерів. Як відомо, при зношуванні робочої поверхні шайби більше як на 0,5 мм на радіус необхідно її замінити, оскільки недопустимо погіршуються умови нагріву сировини. Це призводить до надмірних експлуатаційних витрат, оскільки в такому випадку утилізується понад 90% початкового об'єму металу шайби. Вдосконалений [пат. № 61245] вузол нагрівання сировини (рис. 7, д) складається із обойми 2 та шайби 3 зміненої геометрії. Торець шайби 3 призначений для періодичного зішліфовування з метою

компенсації зміни величини робочого зазору 4. Оператор, при черговому складанні-розкладанні робочої камери екструдера знімає шайбу 3 із валу після чого проводиться зішліфовування її меншого торцю на визначену величину. Внаслідок цього, після складання гвинтів 1 та шайб 3 на валу, відбувається зменшення робочого зазору 4. Завдяки таким конструктивним змінам можливо досягти підвищення фактичної довговічності шайби 3 у кілька разів. Подальше вдосконалення цього вузла [пат. № 101661] передбачає застосування змінних шайб 5 з метою спрощення процесу регулювання зазору.

Автор розуміє, що положення представленої методологічної концепції можуть мати суб'єктивний характер, який обумовлений особистим досвідом та особистим прихиленням автора до тих чи інших методик або їх окремих положень. Однак автор сподівається, що представлена в роботі методологічна концепція буде корисною для широкого кола інженерів та науковців, які займаються розвитком техніки.

Висновки

Розроблено методологічну концепцію вдосконалення технічних систем машинобудівної галузі, зокрема обладнання харчових виробництв. Представлена методологічна концепція дозволяє швидко та чітко з'ясувати цілі вдосконалення технічних систем, ті перешкоди, які заважають такому вдосконаленню, а також найбільш прогресивні шляхи розвитку техніки. Розроблена концепція визначає засоби, якими ці шляхи реалізуються найбільш ефективно. Наведено відповідні приклади з розвитку обладнання харчових виробництв.

Література

1. Косіюк М. М. Основи науково-технічної творчості / М. М. Косіюк, Г.П. Черменський. – Хмельницький, 1997. – 392 с.

2. Орлов П. И. Основы конструирования : справочно-методическое пособие : 2-х кн. / П. И. Орлов. – Изд. 3-е, испр. – М. : Машиностроение, 1988. – 560 с.

3. Заяц Ю. А. Совершенствование технологических процессов в перерабатывающей промышленности / Ю. А. Заяц. – К. : Урожай, 1991. – 192 с.

4. Прейс Г. А. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности / Г. А. Прейс, Н. А. Сологуб, А. И. Некоз. – М. : Машиностроение, 1979. – 239 с.

5. Основные положения методики проведения функционально-стоимостного анализа. Методические рекомендации / [В. М. Герасимов, В. С. Калиш, М. Г. Карпунин, А. М. Кузьмин, С. С. Литвин]. – М. : МП Информ-ФСА, 1991. – 22 с.

6. Альтшуллер Г. С. Алгоритм изобретения / Г. С. Альтшуллер. – М. : Московский рабочий, 1973. – 296 с.

7. Новая философская энциклопедия. – 2-е изд., испр. и допол. – М. : Мысль, 2010. – Т. 1–4. – 2816 с.

8. Некоз О. І. Підвищення міцності перфорованих ножів кутера / О. І. Некоз, І. М. Литовченко, О. В. Батраченко, С. О. Філімонов // Тематичний збірник наукових праць "Обладнання та технології харчових виробництв" Донецького національного університету економіки та торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – 2011. – С. 50–57.

9. Некоз О. І. Обґрунтування шляхів зменшення нагріву фаршу при його подрібненні в емульситаторі / О. І. Некоз, О. В. Батраченко, К. А. Мирошніченко // Вісник ЧДТУ. – 2015. – № 2. – С. 91–98.

10. Некоз О. І. Дослідження умов контакту ножів кутера із сировиною з метою підвищення їх міцності / О. І. Некоз, О. В. Батраченко, І. М. Литовченко, Вербицький С. Б. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси : ЧДТУ, 2012. – № 1. – С. 108–114.

References

1. Kosiyuk, M. M. Osnovy` naukovo-texnichnoyi tvorchosti / M. M. Kosiyuk, G.P. Chermens`ky`j. - Xmel`ny`cz`ky`j, 1997.- 392 s.

2. Orlov, P. Y`. Osnovy konstruy`rovany`ya: Spravochno-metody`cheskoe posoby`e. V 2-x kn. – Y`zd. 3-e, y`spr. / P. Y`. Orlov. – M.: Mashy`nostroeny`e, 1988. – 560 s.

3. Zayacz, Yu. A. Sovershenstvovany`e texnology`chesky`x processov v pererabatyvayushhej promyshlennosty` / Yu. A. Zayacz. – K.: Urozhaj, 1991. – 192 s.

4. Prejs, G. A. Povysheny`e y`znosostojkosty` oborudovany`ya py`shhevoj promyshlennosty`. / G. A. Prejs, N. A. Sologub, A. Y`. Nekoz. – M.: Mashy`nostroeny`e, 1979. – 239 s.

5. Osnovnye polozheny`ya metody`ky` provedeny`ya funkcy`onal`no-stoy`mostnogo analy`za. Metody`chesky`e rekomendacy`y` / [V. M. Gerasy`mov, V. S. Kaly`sh, M. G. Karpuny`n, A. M. Kuz`my`n; S. S. Ly`tvy`n]. - M.: MP Y`nform-FSA, 1991. – 22 s.

6. Al`tshuller, G.S. Algory`tm y`zobreteny`ya / G.S. Al`tshuller .- M. Moskovsky`j rabochy`j, 1973.-296 s.

7. Novaya fy`losofskaya ency`klopedy`ya. — 2-e y`zd., y`spr. y` dopol. — M.: Мысl`, 2010. — T. 1—4. — 2816 s.

8. Nekoz, O. I. Obg`runtuvannya shlyaxiv zmenshennya nagrivu farshu pry` jogo podribnenni v emul`sy`tatori / O. I. Nekoz, O. V. Batrachenko, K. A. My`roshnichenko // Visny`k ChDTU. – 2015. - # 2. – S. 91-98.

9. Nekoz, O.I. Pidvy`shhennya micznosti perforovany`h nozhiv kutera / O. I. Nekoz, I. M. Ly`tovchenko, O. V. Batrachenko, S. O. Filimonov // Tematy`chny`j zbirny`k naukovy`x pracz` "Obladnannya ta texnologiyi xarchovy`x vy`robny`cztv" Donecz`kogo nacional`nogo universy`tetu ekonomiky` ta torgivli im. My`xajla Tugan-Baranovs`kogo. - 2011. – S. 50 – 57.

10. Nekoz, O. I. Doslidzhennya umov kontaktu nozhiv kutera iz sy`rovy`noyu z metoyu pidvy`shhennya yix micznosti / O. I. Nekoz, O. V. Batrachenko, I. M. Ly`tovchenko, Verby`cz`ky`j S. B. // Visny`k Cherkas`kogo derzhavnogo texnologichnogo universy`tetu.– Cherkasy`: ChDTU. - 2012. – #1. – S. 108-114.

Рецензія/Peer review : 10.6.2017 р. Надрукована/Printed :19.8.2017 р.
Рецензент: к. т. н., доц. Мізнік Л. М.

УДК 539.3

А.О. РАМСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

АСИМПТОТИКА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ДЛЯ ПЛИТИ, ПОКРИТОЇ ШАРОМ ІЗ ПОЧАТКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

В роботі досліджена асимптотична поведінка розв'язку задачі про напружено-деформований стан конструкції, що складається із плити, яка лежить на жорсткій основі, та підсилена скріпленим із нею шаром з початковими напруженнями. Встановлено експоненціальне затухання функцій розв'язку.

Ключові слова: двошарова плита, початкові напруження, асимптотика.

A.O. RAMSKY
Khmelnytskyi National University

THE ASYMPTOTIC SOLUTION FOR PLATE UNDER EXTERNAL LOAD BY ITS COVER LAYER WITH INITIAL STRESSES

The double layer plate with initial stresses is considered. A plate rests on a rigid and smooth base. Contact between the layers is ideal. The plate is under combined normal and tangential load. The plate and the load are axisymmetric. The problem of definition of solution at infinity is determined. An analytical type of asymptotic solutions of functions is found. The exponential damping of function solution is established. Obtained results are using at further numerical realization of problem.

Keywords: double layer plate, initial stresses, asymptotic.

У роботі [1] розв'язана осесиметрична задача для нескінченної плити, що лежить на жорсткій основі, покритої шаром-протектором із початковими напруженнями. Показано, що наявність останніх дозволяє зменшити напруження плити. Ціль даної статті – дослідити поведінку розв'язку на нескінченності, що є необхідним при числовій реалізації задачі.

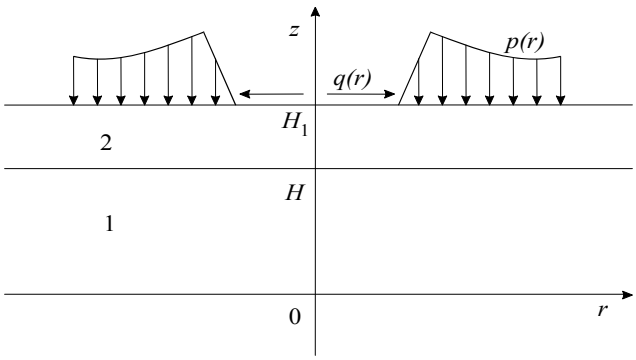


Рис. 1. Плита (1) із захисним шаром (2) на жорсткій основі

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

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

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

Отже, для плити із покриттям (рис. 1) в позначеннях $\tilde{Q}^{(i)}_{33}$ та $\tilde{Q}^{(i)}_{3r}\ (i=1,2)$ нормальні та дотичні напруження *i*-го шару конструкції, $u^{(i)}_3$ та $u^{(i)}_r\ (i=1,2)$ – осьові та радіальні переміщення в [1] отримали:

для плити, тобто 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

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

$$u_3^{(2)}=\frac{m_1^{(2)}}{\sqrt{n_1^{(2)}}}\int_0^\infty \xi\left[\left(\xi A_2(\xi)+(1+z)B_2(\xi)\right)e^{\xi z}+\left(\xi\left(\xi z-s_1^{(2)}\right)C_2(\xi)+\left(s_1^{(2)}-\xi z(3-\xi z)\right)D_2(\xi)\right)e^{-\xi z}\right]J_0(\xi r)\,d\xi$$

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

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

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 $\overline{A}_1(\beta),\overline{B}_1(\beta),\overline{A}_2(\beta),\overline{B}_2(\beta),\overline{C}_2(\beta),\overline{D}_2(\beta)$:

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

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

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

$$M^{(4,4)}=\begin{pmatrix} e_1(\beta) & (2+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) & s^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 & \beta\lambda\mu_1(3-\beta\lambda\mu_1)-s^{(1)}(2-\beta\lambda\mu_1) \\ -e_1(\beta) & -(1+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) & s_0^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 & -s_0^{(1)}+3\beta\lambda\mu_1+(\beta\lambda\mu_1)^2 \\ -e_1(\beta) & -\beta\lambda\mu_1e_1(\beta) & -1+\beta\lambda\mu_1 & -\beta\lambda\mu_1(2-\beta\lambda\mu_1) \\ e_1(\beta) & (1+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) & \beta\lambda\mu_1-s_1^{(1)} & s_1^{(1)}-\beta\lambda\mu_1(3-\beta\lambda\mu_1) \end{pmatrix},$$

$$P^{(4,2)}=\begin{pmatrix} -\kappa\left(1+s^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 th\beta\lambda\mu_1\right) & -\kappa \\ \delta\left(th\beta\lambda\mu_1+\beta\lambda\mu_1\right) & \delta th\beta\lambda\mu_1 \\ 2+\beta\lambda\mu_1 th\beta\lambda\mu_1 & 1 \\ -\chi t\left(\left(1+s_1^{(1)}\right)th\beta\lambda\mu_1+\beta\lambda\mu_1\right) & -\chi th\beta\lambda\mu_1 \end{pmatrix}, \text{ де } e_1(\beta)=e^{-\beta\lambda(1-\mu_1)}.$$

Спочатку знайдемо асимптотичну формулу для функціонального визначника $\Delta(\beta)$ системи (3):

$$\Delta(\beta)=\begin{vmatrix} G & h \\ m & \Delta_1 \end{vmatrix},$$

де

$$G=\begin{vmatrix} 1 & 2+\beta\lambda \\ -1 & -1-\beta\lambda \end{vmatrix},$$

$$\Delta_1=\begin{vmatrix} s^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 & \beta\lambda\mu_1(3-\beta\lambda\mu_1)-s^{(1)}(2-\beta\lambda\mu_1) & -\kappa\left(1+s^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 th\beta\lambda\mu_1\right) & -\kappa \\ s_0^{(1)}+\beta\lambda\mu_1 & -s_0^{(1)}+3\beta\lambda\mu_1+(\beta\lambda\mu_1)^2 & \delta\left(th\beta\lambda\mu_1+\beta\lambda\mu_1\right) & \delta th\beta\lambda\mu_1 \\ -1+\beta\lambda\mu_1 & -\beta\lambda\mu_1(2-\beta\lambda\mu_1) & 2+\beta\lambda\mu_1 th\beta\lambda\mu_1 & 1 \\ \beta\lambda\mu_1-s_1^{(1)} & s_1^{(1)}-\beta\lambda\mu_1(3-\beta\lambda\mu_1) & -\chi t\left(\left(1+s_1^{(1)}\right)th\beta\lambda\mu_1+\beta\lambda\mu_1\right) & -\chi th\beta\lambda\mu_1 \end{vmatrix},$$

$$m=\begin{vmatrix} -e_1(\beta) & -\beta\lambda\mu_1 e_1(\beta) \\ e_1(\beta) & (1+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) \\ -e_1(\beta) & -\beta\lambda\mu_1 e_1(\beta) \\ e_1(\beta) & (1+\beta\lambda\mu_1)e_1(\beta) \end{vmatrix}, \quad h=\begin{vmatrix} \left(s^{(2)}+\beta\lambda\right)e_1(\beta) & \left[\beta\lambda(3-\beta\lambda)-s^{(2)}(2-\beta\lambda)\right]e_1(\beta) & 0 & 0 \\ \left(s_0^{(2)}-\beta\lambda\right)e_1(\beta) & -\left(s_0^{(2)}-3\beta\lambda-\beta^2\lambda^2\right)e_1(\beta) & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Оскільки усі елементи матриць m та h містять нескінченно спадні експоненти $e_1(\beta)$ або дорівнюють нулю, то головний член визначника $\Delta(\beta)$ визначається добутком визначників G та Δ_1.

Мінор $G=1$. Для Δ_1 після перетворень отримаємо

$$\Delta_1(\beta)\approx(\beta\lambda\mu_1)^3\left(-2\delta+2\kappa\left(1-s^{(1)}\right)-\delta\chi s_1^{(1)}+\kappa\chi\left(s^{(1)}-s_1^{(1)}\right)\right).$$

Отже, асимптотична формула для $\Delta(\beta)$ має вигляд:

$$\Delta(\beta)=\Delta_1(\beta)+O\left(e^{-\beta\lambda(1-\mu_1)}\right).$$

Визначення головних членів функцій $\overline{A}_1(\beta),\overline{B}_1(\beta),\overline{A}_2(\beta),\overline{B}_2(\beta),\overline{C}_2(\beta),\overline{D}_2(\beta)$ почнемо із знаходження асимптотичних формул визначників $\Delta_{\overline{A}_2}(\beta)$ та $\Delta_{\overline{B}_2}(\beta)$, які отримаємо з визначника $\Delta(\beta)$ шляхом заміни стовпців при невідомих $\overline{A}_2(\beta),\overline{B}_2(\beta)$ стовпцем вільних членів. У результаті обчислень отримаємо

$$\Delta_{\overline{A}_2}(\beta)\left(=-(1+\beta\lambda)\overline{p}(\beta)-(2+\beta\lambda)\overline{q}(\beta)\right)\Delta_1(\beta)+O\left(\left(\beta^{j_1}\overline{p}(\beta)+\beta^{g_1}\overline{q}(\beta)\right)e^{-\beta\lambda(1-\mu_1)}\right),$$

$$\Delta_{\overline{B}_2}(\beta)=\left(\overline{p}(\beta)+\overline{q}(\beta)\right)\Delta_1(\beta)+\left(\left(\beta^{j_2}\overline{p}(\beta)+\beta^{g_2}\overline{q}(\beta)\right)e^{-\beta\lambda(1-\mu_1)}\right),$$

де j_1,g_1,j_2,g_2 – певні константи. Звідси за формулами Крамера

$$\overline{A}_2(\beta)=\frac{\Delta_{\overline{A}_2}(\beta)}{\Delta(\beta)}\approx=-(1+\beta\lambda)\overline{p}(\beta)-(2+\beta\lambda)\overline{q}(\beta),$$

$$\overline{B}_2(\beta)=\frac{\Delta_{\overline{B}_2}(\beta)}{\Delta(\beta)}\approx\overline{p}(\beta)+\overline{q}(\beta).$$

Оскільки в правих частинах чотирьох останніх рівняннях системи (3) нулі, то ми можемо виразити через $\overline{A}_2(\beta)$ та $\overline{B}_2(\beta)$ функції $\overline{C}_2(\beta),\overline{D}_2(\beta)$, $\overline{A}_1(\beta),\overline{B}_1(\beta)$:

$$\bar{C}_2(\beta) \approx \frac{\kappa\delta + \delta - 2\kappa}{2\kappa + \kappa\chi - \delta}\left(\frac{e_1(\beta)}{\beta\lambda\mu_1}\bar{A}_2(\beta) + e_1(\beta)\bar{B}_2(\beta)\right);$$

$$\bar{D}_2(\beta) \approx \frac{\kappa(\chi - \delta)}{2\kappa + \kappa\chi - \delta}\left(\frac{e_1(\beta)}{(\beta\lambda\mu_1)^2}\bar{A}_2(\beta) + \frac{e_1(\beta)}{\beta\lambda\mu_1}\bar{B}_2(\beta)\right);$$

$$\bar{A}_1(\beta) \approx \frac{2\kappa - 2\delta + \chi - 1}{2\kappa + \kappa\chi - \delta}\left(\beta\lambda\mu_1 e_1(\beta)\bar{A}_2(\beta) + (\beta\lambda\mu_1)^2 e_1(\beta)\bar{B}_2(\beta)\right);$$

$$\bar{B}_1(\beta) \approx \frac{\kappa}{2\kappa + \kappa\chi - \delta}\left(e_1(\beta)\bar{A}_2(\beta) + \beta\lambda\mu_1 e_1(\beta)\bar{B}_2(\beta)\right).$$

Таким чином, знайдено поведінку розв'язку системи функціональних рівнянь (3) на нескінченності.

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. Гузь А.Н. Контактные задачи для упругих тел с начальными (остаточными) напряженими / А.Н. Гузь, В.Б. Рудницкий // Вісник Хмельницького національного університету. – 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 Khmelnytsky National University. – 2017. – Issue 3.

2. Huz A.N. Kontaktnye zadachy dlia upruhykh tel s nachalnymy (ostatochnymy) napriazhenymy / A.N. Huz, V.B. Rudnytskyi // Herald of Khmelnytsky National University. – 2004. – 682 s.

Рецензія/Peer review : 7.7.2017 р. Надрукована/Printed :7.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

УДК 621.01

Р.В. АМБАРЦУМЯНЦ, С.А. РОМАШКЕВИЧ
Одесская национальная академия пищевых технологий

КИНЕТОСТАТИКА МОДИФИКАЦИЙ ГРУПП АССУРА ТРЕТЬЕГО КЛАССА ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА
ЧАСТЬ 1. МОДИФИКАЦИИ С ОДНОЙ И ДВУМЯ ПОСТУПАТЕЛЬНЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМИ

В работе обоснована необходимость изучения и разработки инженерных методов определения реакций в кинематических парах структурных групп Ассура третьего класса третьего порядка. Решены пять задач, охватывающих совокупность возможных вариантов модификаций группы с одной и двумя поступательными кинематическими парами. Предложены два метода решения: разложение неизвестных реакций на взаимно перпендикулярные составляющие и параллельный перенос неизвестной реакции в поступательной кинематической паре данного звена в центр шарнирной кинематической пары на этом же звене. Даны рекомендации по выбору предложенных методов кинетостатики модификаций группы третьего класса третьего порядка.

Ключевые слова: кинетостатика, сила, момент силы, составляющие реакции, плечо, точка приложения, направление, статическое равновесие.

ROBERT VACHAGANOVICH AMBARTSUMYANTS, SERGEY ALEKSANDROVICH ROMASHKEVICH
Odessa National Academy of Food Technologies

DYNAMIC FORCE ANALYSIS OF ASSOURE GROUP MODIFICATIONS OF THE THIRD CLASS OF THE THIRD ORDER

Dynamic force analysis of the mechanisms is one of the determining steps of their protecting. Not fulfilling of this stage doesn't allow to carry out calculations for strength and hardness of the elements of kinematic pairs, and sections themselves and to prepare the basis for designing. The aim of the work is development of the engineering methods of dynamic force analysis of Assoure group modifications of the third class of the third order, because in the educational and technical literature they are absent, though their functional possibilities are much wider and more various, than modifications of the second order groups. It has been stated that a general number of possible modifications or the examined group equals 56, however, because of isomorphoness of some modifications, their real number is much smaller. Because of a large volume of work in the given article, the modifications with one and two sliding kinematic pairs, created by substitution of rotatory kinematic pairs with sliding ones at the ends of the carriers and at the base triangular link of the group, have been considered. Five tasks, covering totality of the possible variants of modifications with one or two sliding kinematic pairs, have been solved. Two methods of solution have been suggested: decomposition of the unknown reactions into inter-perpendicular components and parallel carry of the unknown reaction in the sliding kinematic pair of the given link into the centre of the jointed kinematic pair at the same link. It has been stated that the suggested methods are equivalent, however the method of decomposition into the components requires more graphic plottings and the method of parallel carry requires more arithmetic calculations.

Keywords: dynamic force analysis, force, force moment, reaction components, arm, fulcrum, direction, static equilibrium.

Силовое исследование любого проектируемого устройства является весьма важным этапом на стадии конструирования. Найденные при таком исследовании усилия в кинематических парах механизмов позволяют не только конструировать их элементы, но и определить вид деформации звеньев механизмов. Это дает возможность определить объемные размеры звеньев исходя из условий необходимой их прочности и жесткости.

В настоящее время для нахождения значений реакций в кинематических парах наиболее широко применяется метод кинетостатики, что позволяет задачу динамики привести к задаче статики и тем самым упростить решение [1, 2, и др.]. Как правило, для этого из состава механизма выделяют статически определяемые группы Ассура по классификации Ассура – Артоболевского и выполняют силовое исследование каждой группы отдельно с определенной последовательностью и завершается работа силовым исследованием входных или начальных звеньев [1, 2 и др.].

В практике машиностроения в машинах и механизмах наиболее широкое применение нашли механизмы, синтезированные на основе групп Ассура второго класса. Как показали исследования, эти группы не обладают широкими функциональными возможностями, хотя их кинематическое и динамическое исследование выполняется довольно простыми методами. Для механизмов, отнесенных к механизмам второго класса, в учебной и технической литературе разработаны специальные методы как кинематического, так и силового исследования с приложениями прикладных программ [4 и др.].

На практике нашли также сравнительно широкое применение механизмы, синтезированные на базе группы Ассура третьего класса третьего порядка, обладающие более широкими функциональными возможностями по сравнению с механизмами второго класса. До настоящего времени наиболее всесторонне исследована в области кинематики и кинетостатики группа Ассура третьего класса с вращательными кинематическими парами[1, 4 и др.], хотя в технике применяются механизмы, в которых использованы группы Ассура третьего класса с одной или двумя поступательными парами. Однако как в учебной, так и в технической литературе в настоящее время отсутствуют упрощенные методы для практического применения конструкторами с целью силового исследования таких групп с различными сочетаниями поступательных и вращательных кинематических пар.

Целью настоящей работы является разработка простых инженерных методов силового исследования различных модификаций группы Ассура третьего класса.

На рис. 1 представлена группа Ассура третьего класса третьего порядка с вращательными кинематическими парами. Поскольку каждую вращательную пару можно выполнить поступательной, то общее количество их комбинаций (модификаций) составит

$$M = \sum_{i=1}^{6} C_6^i , \qquad (1)$$

где $\sum_{i=1}^{6} C_6^i$ – сочетание из шести элементов с $i = 1...6$ элементов, соответствующих количеству поступательных кинематических пар.

В выражении (1) модификация по сочетанию C_6^6 не может существовать, поскольку группа приобретает подвижность. Во второй части данной работы будет показано, что модификации по сочетаниям C_6^5 также не могут существовать. В таком случае общее число возможных модификаций равно

$$M = C_6^1 + C_6^2 + C_6^3 + C_6^4 = 6 + \frac{6 \cdot 5}{1 \cdot 2} + \frac{6 \cdot 5 \cdot 4}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 56 .$$

Разумеется, некоторые из этих модификаций являются изоморфными. Например, модификации группы, полученные изменением концевых вращательных кинематических пар A, B, C поступательными, являются изоморфными и их исследования можно выполнить одним и тем же методом. Поэтому в дальнейшем рассматривается только один вариант кинетостатики из изоморфных структурных групп. Аналогичная картина наблюдается, если поочередно заменить вращательные кинематические пары *D*, *E*, *G* поступательными. Следовательно, количество вариантов модификаций группы существенно уменьшается.

Отметим, что при рассмотрении отдельных модификаций необходимо следить за тем, чтобы в них не появилась подвижность. Обычно такое явление может наблюдаться при числе поступательных кинематических пар два и больше. Для исключения появление подвижности в модификациях группы принимаем:

- при образовании различных модификаций линии перемещения смежных поступательных кинематических пар на одном и том же звене не параллельны;
- кинематические показатели всех звеньев (положение, скорость, ускорение) известны;
- звенья группы являются абсолютно жесткими;
- зазоры в кинематических парах отсутствуют;
- на первом этапе кинетостатики силы трения не учитываются.

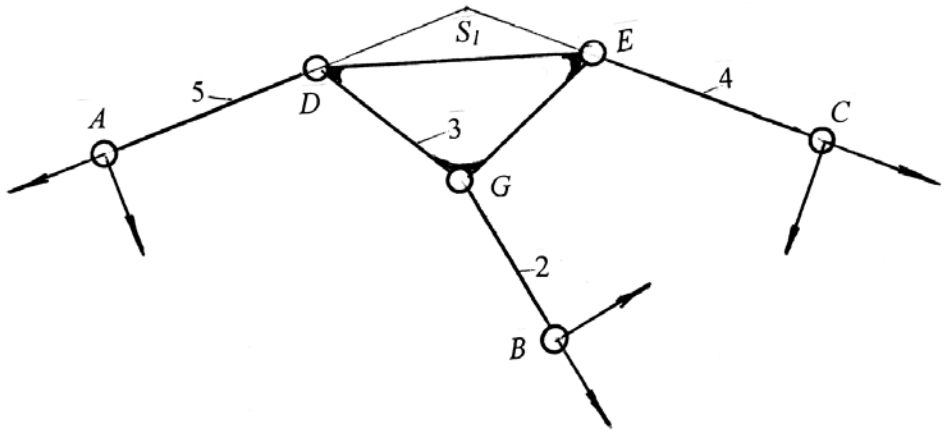


Рис. 1. Группа Ассура третьего класса третьего порядка с вращательными парами

Отметим, что общим методом силового исследования для всех разновидностей группы является составление системы 12 алгебраических уравнения. Из решения такой системы находят все 12 неизвестных. Однако такой подход в практике конструирования не нашло применение. Чаще всего применяются более простые методы, позволяющие более просто определить реакции, как векторы, что позволяет быстрее принимать то или иное решение, тем более, что такие методы легко реализуются на современных персональных компьютерах с высокой разрешаемой способностью.

Упрощение силового исследования группы третьего класса достигается использование особых точек Ассура, полученные на пересечении продольных осей поводков, например, 5, 4 или 2, 4 или 2, 5 , например, S_1 (рис. 1) [1]. После разложения реакций в шарнирах A, B, C на составляющие по продольным осям соответствующих поводков и в перпендикулярном направлении из условия равновесия каждого поводка, составляя уравнения равновесия моментов сил относительно центров шарниров D, E, G

определяют перпендикулярные составляющие соответствующих реакций. Затем, составляют уравнение равновесия моментов сил всей группы относительно точки Ассура, например, S_1. Из этого уравнения определяют составляющую реакции в шарнире B, направленную по продольной оси звена 2. После этого, нахождение реакций в остальных кинематических парах не представляет труда, так как рассматривается статическое равновесие каждого звена в отдельности.

Ниже рассматриваются задачи и их решения для различных модификаций группы третьего класса третьего порядка, содержащие одну и две поступательные кинематические пары. Предлагается два способа определения реакций в кинематических парах:

первый – разложение реакций в шарнирных соединениях на взаимно перпендикулярные составляющие по линии поступательного перемещения и перпендикулярно;

второй – параллельный перенос неизвестной реакции в поступательной кинематической паре в центр вращательной кинематической пары соответствующего звена.

Задача 1. Одна концевая вращательная пара группы, например, A, заменена поступательной парой (рис. 2, а).

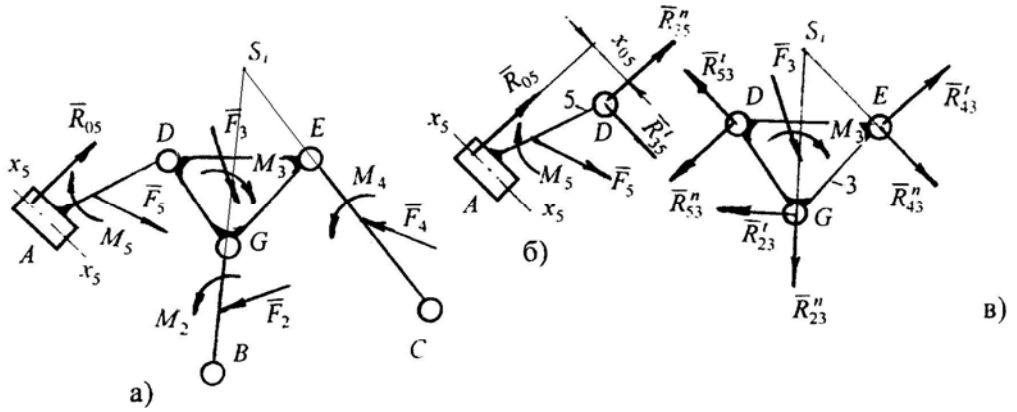


Рис. 2. Модификация группы: а – с одной поступательной парой, б – звено 5 в статическом равновесии, в – звено 3 в статическом равновесии

Группа загружена равнодействующими всех внешних сил и моментов, а также сил инерции и моментов сил инерции. Предполагаем, что звено 2 соединяется с начальным звеном будущего механизма, а поводки 4 и 5 – с основанием.

Представим решение задачи первым методом.

Реакции в шарнирах B и C разлагаем на две составляющие – по продольной оси звена и перпендикулярно[1]. Обозначим через $x_5 - x_5$ линию перемещения звена 5. Реакция $\overline{R}_{05}$ в кинематической паре A направим перпендикулярно к $x_5 - x_5$ (рис. 2, б). Находим особую точку Ассура S_1 в пересечении продольных осей поводков 2 и 4 (рис. 2, а). Определить значение реакции $\overline{R}_{05}$ из уравнения равновесия моментов сил группы невозможно, так как в этом уравнении два неизвестных – кроме значения силы $\overline{R}_{05}$ неизвестна также точка ее приложения. Рассмотрим равновесие пятого звена (рис. 2, б). Реакцию в шарнире D разложим на две составляющие $\overline{R}_{35} = \overline{R}_{35}^n + \overline{R}_{35}^t$ – перпендикулярно $x_5 - x_5$ и параллельно. Составляем уравнение равновесия проекций сил звена 5 на линию $x_5 - x_5$ и находим составляющую $\overline{R}_{35}^t$. Теперь рассматриваем равновесие третьего, так называемого, базового звена (рис. 2, в). Предварительно, разложив реакции в шарнирах G и E на составляющие по продольным осям звеньев 2 и 4 и перпендикулярно, из условия равновесия этих же звеньев, составляя уравнения равновесия моментов сил относительно центров шарниров G и E, находим составляющие $\overline{R}_{23}^t$ и $\overline{R}_{43}^t$.

В пересечении линий действия неизвестных $\overline{R}_{23}^n$ и $\overline{R}_{43}^n$ находим особую точку Ассура S_1 (рис. 2, в). Составляем уравнение равновесия моментов сил звена 3 относительно точки S_1 и из этого уравнения находим составляющую $\overline{R}_{53}^n$. Теперь, из уравнения равновесия проекций сил звена 5 на линию, перпендикулярную $x_5 - x_5$ находим составляющую $\overline{R}_{35}^n$. Из уравнения равновесия моментов сил этого же звена относительно центра шарнира D находим точку приложения реакции $\overline{R}_{05}$ (расстояние x_{05}). После этого, нахождение реакций в других кинематических парах не представляет труда, используя общепринятые методы статики.

[1] Примечание. Индексы реакций обозначены по методике, принятой в теории механизмов и машин.

Второй метод – параллельный перенос сил. Рассматриваем статическое равновесие звена 5 (рис. 3, а). В центре шарнира D реакция $\overline{R}_{35}$ условно не показана, которую, однако, в дальнейшем необходимо определить. Кратчайшее расстояние от центра шарнира D до линии действия силы $\overline{R}_{05}$ обозначим через x_{05}. В центре шарнира D приложим систему сил $\left(\overline{R}_{05}-\overline{R}_{50}\right)\infty 0$. Поскольку звено 5 находится в статическом равновесии, то из уравнения равновесия сил относительно центра шарнира D находим

$$\overline{R}_{05}\cdot x_{05}=M_{05}=\Sigma_D(F)^{(5)}. \qquad (2)$$

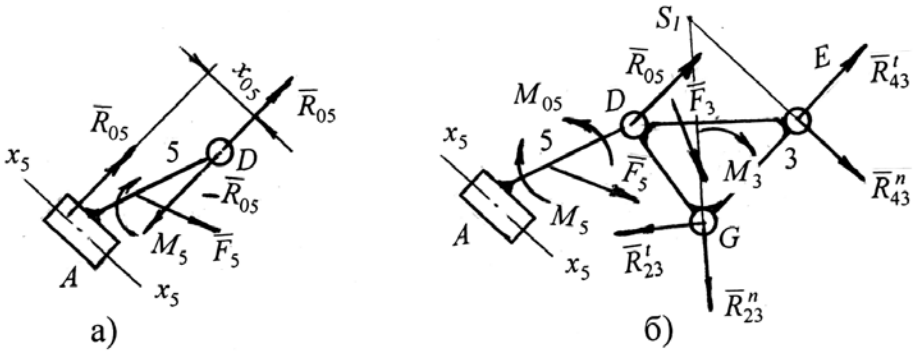


Рис. 3. Модификация группы: а – звено 5 в статическом равновесии, б – кинематическая цепь звенья 3-5

Рассматриваем теперь кинематическую цепь из двух звеньев – 5 и 3 (рис. 3, б). Аналогично предыдущему случаю, предварительно определяем составляющие реакций в шарнирах G и E, разложенные по продольным осям соответствующих звеньев и перпендикулярно. В таком случае в центре шарнира D действует внешняя сила $\overline{R}_{05}$, а на звене 5 появляется дополнительный момент M_{05}. В пересечении линий действия неизвестных $\overline{R}^n_{23}$ и $\overline{R}^n_{43}$ находим особую точку Ассура S_1. Составляем уравнение равновесия моментов сил рассматриваемой цепи относительно этой точки, из которого находим модуль и направление реакции $\overline{R}_{05}$. Тогда из выражения (2) находим x_{05}, что определяет точку приложения реакции $\overline{R}_{05}$. На основании векторного уравнения равновесия сил кинематической цепи 5-3 находим векторы $\overline{R}^n_{23}$ и $\overline{R}^n_{43}$. Нахождение остальных реакций уже не представляет трудностей.

Сравнение решения поставленной задачи двумя методами показывает, что они мало чем отличаются с точки зрения трудности или объема вычислений, т.е. они равноценны. Поэтому в дальнейшем поставленные другие задачи будут решены только одним методом. Другие модификации группы, полученные, путем трансформации поочередно вращательных пар B и C в поступательные выполняется аналогичным образом. Исследователь при каждом конкретном случае может выбрать тот или иной метод, рассматривая возможность уменьшения числа слагаемых в уравнениях моментов сил относительно выбранной точки.

Задача 2. Рассмотрим решение задачи, когда одна из шарнирных пар группы на базовом звене 3, например, D выполнена поступательной (рис. 4, а). Отделим звено 5 от группы и рассмотрим его в статическом равновесии, загружая его равнодействующими внешних сил и моментов, в том числе сил инерции и моментов сил инерции (рис. 4, б). Обозначим направляющую прямую поступательной пары через x_3-x_3. Реакция $\overline{R}_{35}$ перпендикулярна прямой линии x_3-x_3. Кратчайшее расстояние линии действия силы $\overline{R}_{35}$ до центра шарнира A обозначим через h_3. Реакцию в шарнире A разложим на две составляющие: $\overline{R}^t_{05}$ – параллельно прямой x_3-x_3 и $\overline{R}^n_{05}$ – перпендикулярно этой же прямой. Из уравнения равновесия проекций сил звена 5 по направляющей прямой x_3-x_3 находим вектор $\overline{R}^t_{05}$. Для уменьшения вычислительных операций рассматриваем статическое равновесие звеньев 2 и 4 раздельно. Разлагаем реакции в шарнирах G и E на составляющие – по продольным осям звеньев 2 и 4 и перпендикулярно. Из условия равновесия этих же звеньев, составляя уравнения равновесия моментов сил относительно центров шарниров B и C, находим составляющие $\overline{R}^t_{23}$ и $\overline{R}^t_{43}$. Далее рассматриваем статическое равновесие кинематической цепи из звеньев 5 и 3. В пересечении линии действия неизвестных $\overline{R}^n_{23}$ и $\overline{R}^n_{43}$ находим особую точку Ассура S_1 (рис. 4, в). Составляем уравнение равновесия моментов сил звена 3 относительно точки S_1: $\Sigma_D(F)^{(3)}=0$. Отсюда находим значение и направление вектора $\overline{R}^n_{05}$. Затем составляем векторное уравнение равновесия сил $\Sigma(\overline{F})^{(3,5)}=0$ и строим план сил, откуда находим векторы

$\overline{R}_{23}^{n}$ и $\overline{R}_{43}^{n}$. Для нахождения точки приложения реакции $\overline{R}_{35} = -\overline{R}_{53}$ составляем уравнение равновесия моментов сил звена 5 относительно центра шарнира A (рис. 4, б) и находим расстояние h_3. Реакции в шарнирах B и C находим из планов сил, построенных для звеньев 2 и 5.

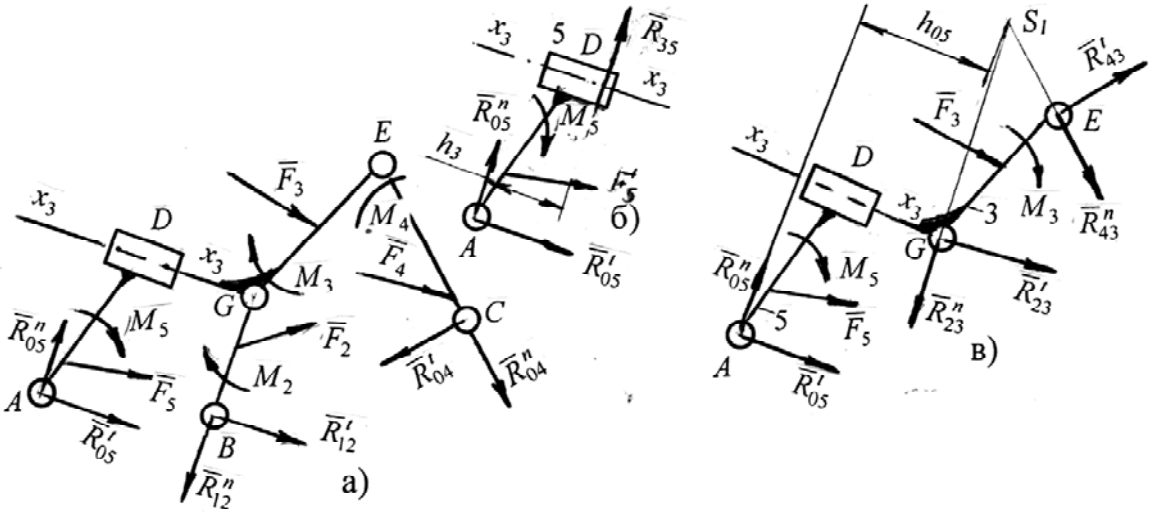


Рис. 4. Модификация группы: а – с одной поступательной парой на базовом звене, б – звено 5 в статическом равновесии, в – кинематическая цепь 3-5

Примечание. В последующих задачах, для упрощения рисунков, предполагаем, что на группах Ассура действуют внешние силы и момент, силы инерции и моменты сил инерции не показывая их.

Задача 3. Модификация группы третьего класса с двумя поступательными парами на концах поводков (рис. 5, а). Определение реакций в кинематических парах этой модификации целесообразно провести методом разложения сил, так как метод параллельного переноса сил приводит к уравнению равновесия моментов сил с большим количеством слагаемых. Решение задачи начинаем со звеньев 5 и 4 (рис. 5, б, в). Обозначим $x_5 - x_5$ и $x_4 - x_4$ линии поступательного перемещения звеньев 5 и 4 соответственно. Реакции в шарнирах D и E разлагаем на составляющие – перпендикулярно к прямым $x_5 - x_5$ и $x_4 - x_4$ ($\overline{R}_{35}^{n}$ и $\overline{R}_{34}^{n}$) и параллельно ($\overline{R}_{35}^{t}$ и $\overline{R}_{34}^{t}$), соответственно. Из уравнения равновесия проекций сил на направления $x_5 - x_5$ и $x_4 - x_4$ находим векторы $\overline{R}_{35}^{t}$, $\overline{R}_{34}^{t}$. Далее рассматриваем статическое равновесие базового звена 3 (рис. 5, г). Реакцию в шарнире G разлагаем на две составляющие – по продольной оси поводка 2 ($\overline{R}_{23}^{n}$) и перпендикулярно ($\overline{R}_{23}^{t}$). Вектор $\overline{R}_{23}^{t}$ находим из уравнения равновесия моментов сил звена 2 относительно центра шарнира B. На пересечении неизвестных $\overline{R}_{53}^{n} = -\overline{R}_{35}^{n}$ и $\overline{R}_{43}^{n} = -\overline{R}_{34}^{n}$ находим особую точку Ассура S_1 (рис. 5, г). Составляем уравнение равновесия моментов сил звена 3 относительно точки S_1. Из этого уравнения находим неизвестный вектор $\overline{R}_{23}^{n}$. На основании векторного уравнения равновесия сил звена 3 строим план сил для нахождения неизвестных векторов $\overline{R}_{43}^{n} = -\overline{R}_{34}^{n}$ и $\overline{R}_{53}^{n} = -\overline{R}_{35}^{n}$. Векторы $\overline{R}_{05}$ и $\overline{R}_{04}$ находим из уравнения равновесия проекций сил звеньев 5 и 4 на прямых, перпендикулярных к направляющим $x_5 - x_5$ и $x_4 - x_4$ соответственно. Точки приложения этих векторов (расстояния x_{05} и x_{04} рис. 5, б, в) находим из уравнения равновесия моментов сил соответствующих звеньев относительно центров шарниров D и E.

Задача 4. Модификация группы Ассура с двумя поступательными парами, образованными одним из поводков (рис. 6, а). Решение задачи начинаем со звена 5 (рис. 6, б). Поскольку направления реакций $\overline{R}_{05}$ и $\overline{R}_{35}$ известны (они перпендикулярны к соответствующим направляющим), то построив план сил для этого звена, находим векторы $\overline{R}_{05}$, $\overline{R}_{35}$. Реакции в шарнирах G, E разлагаем на составляющие, направив их по продольным осям соответствующих звеньев и перпендикулярно (рис. 6, в). Из уравнения равновесия моментов сил звеньев 2 и 4 относительно центров шарниров B и C находим составляющие $\overline{R}_{32}^{t}, \overline{R}_{34}^{t}$. Загружаем звено 3 векторами $\overline{R}_{53} = -\overline{R}_{35}$, $\overline{R}_{23}^{n} = -\overline{R}_{32}^{n}$, $\overline{R}_{43}^{n} = -\overline{R}_{34}^{n}$, $\overline{R}_{23}^{t} = -\overline{R}_{32}^{t}$, $\overline{R}_{43}^{t} = -\overline{R}_{34}^{t}$. На пересечении неизвестных векторов $\overline{R}_{23}^{n} = -\overline{R}_{32}^{n}$ и $\overline{R}_{43}^{n} = -\overline{R}_{34}^{n}$ находим особую точку Ассура S_1 (рис. 6, в). Составляем уравнение равновесия моментов сил звена 3 относительно точки S_1. Из этого уравнения

находим параметр x_{53}, определяющий точку приложения реакции $\overline{R}_{35}$. Для нахождения точки приложения реакции $\overline{R}_{05}$ составляем уравнение равновесия моментов сил звена 5 относительно точки приложения реакции $\overline{R}_{35}$ (рис. 6, б). Из этого уравнения находим расстояние x_{05}, определяющее точку приложения реакции $\overline{R}_{05}$. Полные реакции в шарнирах *B* и *C* легко определить из плана сил звеньев 2 и 4.

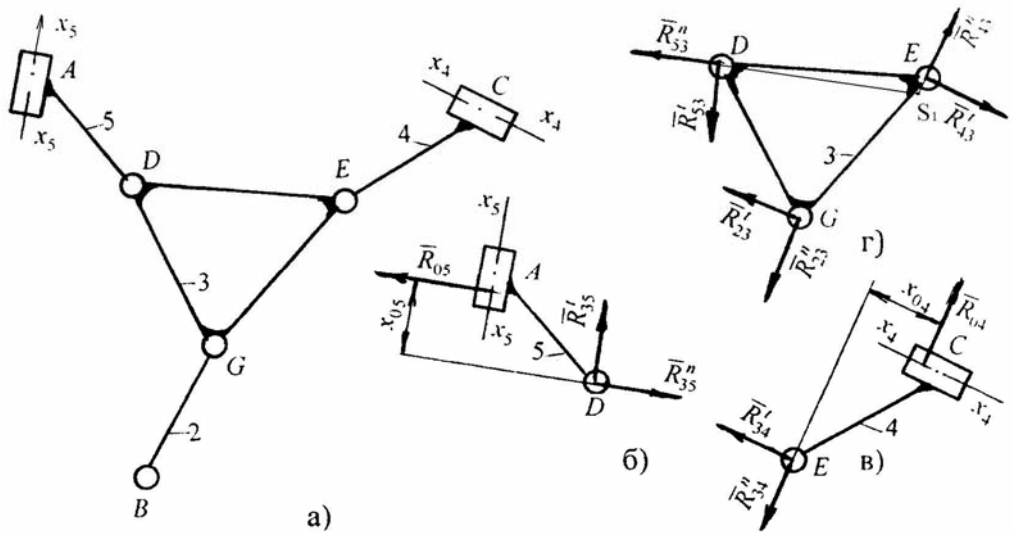


Рис. 5. Модификация группы: а – с двумя поступательными парами на концах поводков, б – статическое равновесие звена группы 5, в – статическое равновесие звена группы 4

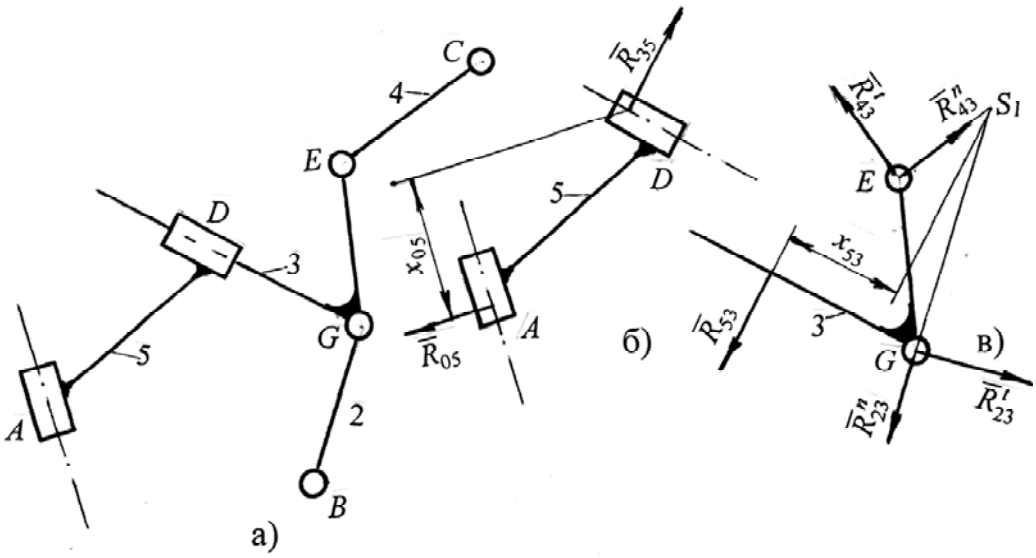


Рис. 6. Модификация группы: а – группа с двумя поступательными парами, б – расчетная схема звена 5, в – расчетная схема звена 3

Задача 5. Модификация группы Ассура с двумя поступательными парами на базовом звене 3 (рис. 7, а). Задачу решаем в следующей последовательности. Отделим звенья 4, 5 и рассмотрим их статическое равновесие (рис. 7, б, в). Обозначим через $x_{43}-x_{43}$ и $x_{53}-x_{53}$ направляющие поступательных пар E и D. Реакции в шарнирах C и A разложим на составляющие - параллельно направляющим $x_{43}-x_{43}$, $x_{53}-x_{53}$ и перпендикулярно соответственно (рис. 7, б, в). Из уравнений проекций сил звеньев 4 и 5 на прямые, перпендикулярные направляющим $x_{43}-x_{43}$, $x_{53}-x_{53}$ находим векторы $\overline{R}^t_{04}$, $\overline{R}^t_{05}$. Рассматриваем равновесие кинематической цепи 5-3-4 (рис. 7, г). Загружаем цепь векторами $\overline{R}^t_{05}, \overline{R}^n_{05}$, $\overline{R}^t_{04}$, $\overline{R}^n_{04}$, $\overline{R}^t_{23}=-\overline{R}^t_{32}$, $\overline{R}^n_{23}=-\overline{R}^n_{32}$. Вектор $\overline{R}^t_{23}$ предварительно определим из уравнения моментов сил звена 2 относительно центра шарнира B. На пересечении линий действия сил $\overline{R}^n_{04}$ и $\overline{R}^n_{23}$ находим особую точку Ассура S_1. Из уравнения равновесия моментов сил кинематической цепи 5-3-4 относительно точки S_1 находим вектор $\overline{R}^n_{05}$. На основании векторного уравнения равновесия сил этой же цепи построим план сил,

откуда находим векторы $\overline{R}_{04}^{n}$ и $\overline{R}_{23}^{n}$. Для определения точек приложения векторов $\overline{R}_{34}$ и $\overline{R}_{35}$ (рис. 7, б, в) составляем уравнения равновесия моментов сил звеньев 4 и 5 относительно центров шарниров C и A (расстояния x_{34} и x_{35}). Полную реакцию в шарнире B находим из плана сил, построенного для второго звена.

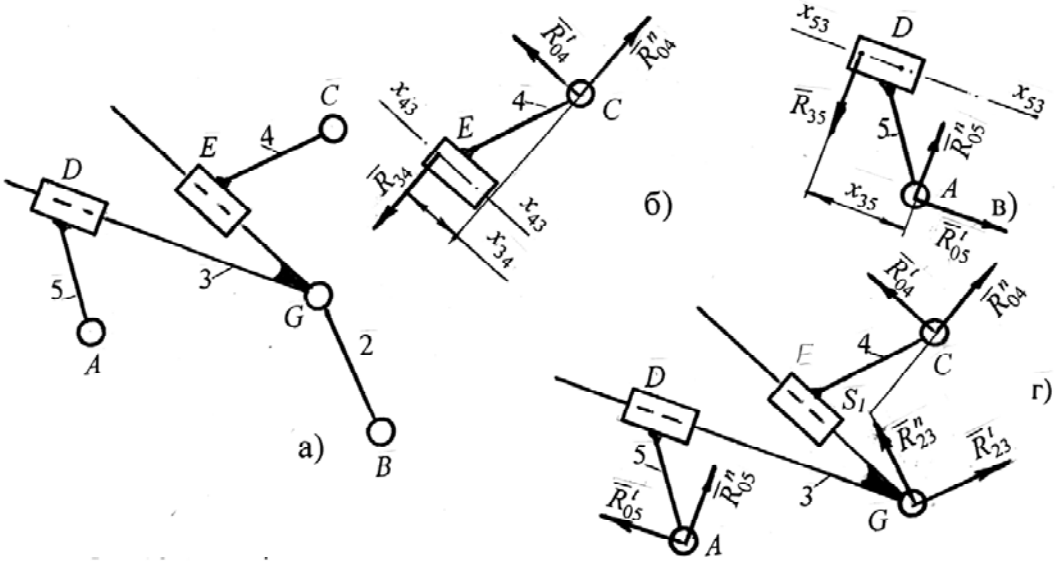


Рис. 7. Модификация группы Ассура: а – с двумя поступательными парами на базовом звене 3, б – расчетная схема звена 4, в – расчетная схема звена 5, г – расчетная схема кинематической цепи 5-3-4

Выводы

1. Общее количество модификаций группы Ассура третьего класса третьего порядка равно 56. Однако реальное их число значительно меньше из-за изоморфности некоторых их разновидностей. Например, сочетание $C_6^1 = 6$, (6 модификаций, четыре из которых изоморфны), сочетание $C_6^2 = 15$ (15 модификаций, десять их которых изоморфны).

2. Предложенные два метода кинетостатики равноценны. Выбор метода зависит от того, что больше подходит исследователям. Метод разложения сил на составляющие требует больше графических построений, а метод параллельного переноса сил – больше слагаемых в уравнениях равновесия моментов и, следовательно, больше вычислительных операций.

Литература

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И.И. Артоболевский. – 4-е изд., перераб. и допол. − М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1988. – 640 с.

2. Левитский Н. И. Теория механизмов и машин / Н. И. Левитский. – М. : Наука, 1990. – 592 с.

3. Озол О.Г. Теория механизмов и машин / под редакцией С.Н. Кожевникова. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1984. – 432 с.

4. Белоконев И.М. Теория механизмов и машин. Методы автоматизированного проектирования / И.М. Белоконев. – К. : Вища шк., 1990. – 208 с.

References

1. Artobolevskyi Y.Y. Teoryia mekhanyzmov y mashyn : ucheb. dlia vuzov / Y.Y. Artobolevskyi. – 4-e yzd., pererab. y dopol. − M. : Nauka. Hl. red. fyz.-mat. lyteraturы, 1988. – 640 s.

2. Levytskyi N. Y. Teoryia mekhanyzmov y mashyn / N. Y. Levytskyi. – M. : Nauka, 1990. – 592 s.

3. Ozol O.H. Teoryia mekhanyzmov y mashyn / pod redaktsyei S.N. Kozhevnykova. – M. : Nauka. Hl. red. fyz.-mat. lyteratury, 1984. – 432 s.

4. Belokonev Y.M. Teoryia mekhanyzmov y mashyn. Metodы avtomatyzyrovannoho proektyrovanyia / Y.M. Belokonev. – K. : Vyshcha shk., 1990. – 208 s.

Рецензія/Peer review : 24.05.2017 р. Надрукована/Printed :4.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гладушняк А.К.

УДК 517.95

І.Г. ДОБРОТВОР
Тернопільський національний економічний університет
І.В. ЧИХІРА, І.Т. ЯРЕМА
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

УМОВИ КОЛИВНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК КІНЕТИКИ МІКРОСТРУКТУР КОМПОЗИТІВ

У роботі досліджено умови коливних процесів поширення зовнішніх поверхневих шарів (ЗПШ) – мікроструктур навколо частинок дисперсного наповнювача в процесі формування епоксидних композитів. Динаміка їх геометричних характеристик підлягає математичному моделюванню з допомогою диференціальних рівнянь із частинними похідними, що містять оператор Лапласа-Бельтрамі. Однією із найважливіших проблем, що досліджується в даній роботі, є питання коливності розв'язків, достатні умови якої отримані у полі коефіцієнтів деяких типів рівнянь.

Ключові слова: структура, композит, динаміка, шари, диференційні рівняння, коливність.

I.G. DOBROTVOR
Ternopil National Economical University
I.V. CHYHIRA, I.T. JAREMA
Ternopil National Technical University named after Ivan Puljuj

CHARACTERISTICS OSCILLATION CONDITIONS OF THE COMPOSITES MICROSTRUCTURES KINETICS

Dynamics of some processes, stitching epoxides, such as the distribution of external surface layers in the presence of particulate or fibrous fillers in composite materials can be modelled by the equations, the variables which are changed in mathematical spaces of constant curvature. In the paper we investigate the conditions of oscillatory processes spread outside the surface layers of structures around the particles of the dispersed filler in the formation of epoxy composites. Mathematical models of the real processes, in particular problems of microstructures kinetics of epoxy composites often is comfortable to describe with differential equations, the variables of which are measured not only in Euclidean space but also in other spaces. The dynamics of their geometric characteristics subject to mathematical modelling by differential equations containing the Laplas-Beltramy operator. Oscillatory properties of the dynamic characteristics behaviour were obtained for the predictable regulation operational heterogeneous materials characteristics.

Key words: structure, composites, dynamics, layers, differential equations, oscillation.

Постановка задачі. Одним із головних завдань при формуванні композитних матеріалів (КМ) є забезпечення оптимальних умов фізико-хімічної взаємодії на межі поділу фаз "оліґомер-наповнювач". Ступінь зшивання у ЗПШ також суттєво впливає на адгезійну та когезійну міцність КМ і визначає їх фізико-механічні та теплофізичні властивості. Тому дослідження динаміки процесів формування, зміни структурних характеристик і геометричних розмірів ЗПШ при структуроутворенні матеріалу, а також створення методів їх прогнозованого регулювання є актуальною задачею сучасного матеріалознавства при створенні композитів та покриттів на їх основі [1, 2].

Динаміка деяких процесів зшивання епоксипластів, зокрема поширення зовнішніх поверхневих шарів при наявності дисперсного чи волокнистого наповнювачів у композитних матеріалах може бути змодельована рівняннями, змінні яких міняються в просторах постійної кривини. За звичай під ними розуміють простори з евклідовою геометрією, проте існують і інші простори з кривиною відмінною від нуля і постійною для всіх точок простору, геометрії називають гіперболічними і сферичними. Такі геометрії реалізуються на добре відомих поверхнях евклідового простору. У випадку гіперболічної геометрії – це псевдосфери, а у випадку сферичної геометрії – звичайні сфери. Кривина сфери є постійною додатною величиною, а у псевдосфери – від'ємна.

Математичні моделі реальних процесів, зокрема задачах проблем кінетики мікроструктур епоксикомпозитів часто є зручним описувати диференціальними рівняннями, змінні яких вимірюються не лише в евклідовому просторі але і в інших просторах.

Методика досліджень. Однією із найважливіших проблем, що досліджується в даному розділі, є питання коливності розв'язків. Історично це питання вивчається давно і пов'язане, як правило, із вивченням розв'язності краєвих задач для диференціальних рівнянь [3, 4]. Відомо, що перетворення в нуль розв'язків диференціальних рівнянь другого порядку вказує на можливість розв'язності відповідної краєвої задачі [5–7].

Дослідимо рівняння з постійними коефіцієнтами

$$Lu + pu = 0\,, \tag{1}$$

шляхом приведення його до відповідних звичайних рівнянь. Проінтегруємо рівняння (1) по «сфері» S_r простору H^n:

$$\frac{1}{A(r)} \cdot \iint_{S_r} Lu \cdot dS + \frac{1}{A(r)} \iint_{S_r} pu \cdot dS = 0\,.$$

Використаємо формулу для середнього значення аналітичного розв'язку u(X) рівняння (1) по сфері S_r

$$M_r[u(X),P_0]=\frac{1}{\omega_n r^{n-1}}\iint\limits_{S_r}u(X)dS,$$

де ω_n – площа n – вимірної сфери одиничного радіуса, S_r – сфера радіуса r з центром у деякій фіксованій точці $P_0\in D$, отримуємо:

$$M''+\frac{A'(r)}{A(r)}\cdot M'+pM=0. \tag{2}$$

Зведемо рівняння (2) до канонічного вигляду

$$\phi''+B(r)\cdot\phi=0.$$

Для цього виконаємо заміну $M(r)=z(r)\cdot\phi(r)$, де $z(r)$ виберемо, розв'язуючи рівняння

$$2z'+A'(r)\cdot A^{-1}(r)\cdot z=0.$$

Звідси отримуємо $z=A^{-\frac{1}{2}}(r)$. Коефіцієнт при φ визначимо по формулі:

$$B(r)=z''+\frac{A'(r)}{A(r)}\cdot z'+p\cdot z=A^{\frac{1}{2}}(r)\cdot\left(\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{A'(r)}{A(r)}\right)^2-\frac{1}{2}\cdot\frac{A''(r)}{A(r)}-p\right).$$

Кінцевий вигляд рівняння (2) в канонічній формі запишеться так:

$$\phi''+\left(\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{A'}{A}\right)^2-\frac{A''}{2A}+p\right)\phi=0. \tag{3}$$

Зауваження 1. Для встановлення достатніх умов неколивності рівняння (3) можна використати простий критерій невід'ємності функції при φ.

Після знаходження розв'язку $\phi(r)$ рівняння (3) визначаємо

$$M(r)=A^{\frac{1}{2}}(r)\cdot\phi(r).$$

Розглянемо різні випадки розв'язків (2) у просторах постійної кривини.

Для E^n маємо $A(r)=\omega_n\cdot r^{n-1}$, тоді коефіцієнт при φ у рівнянні (3) має вигляд:

$$\frac{1}{4}\left(\frac{(n-1)\cdot r^{n-2}}{r^{n-1}}\right)^2-\frac{1}{2}\left(\frac{(n-1)(n-2)r^{n-3}}{r^{n-1}}\right)+p=\left(\frac{n-2}{2r}\right)^2+\frac{1}{4r^2}+p.$$

В евклідовому просторі рівняння (3) представляє собою рівняння Бесселя порядку $\frac{n-2}{2}$:

$$\phi''+\left(\frac{1}{4r^2}-\left(\frac{n-2}{2r}\right)^2+p\right)\phi=0. \tag{4}$$

Дійсно, якщо рівняння Бесселя

$$w''+\frac{w'}{r}+\left(p-\frac{\nu^2}{r^2}\right)w=0$$

привести до канонічного виду, то отримаємо, що $z=r^{-\frac{1}{2}}$, а φ визначається рівнянням (4) при $\frac{n-2}{2}=\nu$.

Загальний розв'язок рівняння (2) в просторі E^n, таким чином, запишеться по формулі:

$$M(r)=\left(\sqrt{p}r\right)^{-\frac{n-2}{2}}\left(J_{\frac{n-2}{2}}(\sqrt{p}r)\cdot c_1+N_{\frac{n-2}{2}}(\sqrt{p}r)\cdot c_2\right), \tag{5}$$

де через $J_\nu(t),N_\nu(t)$ позначені функції Бесселя та Неймана відповідно. Оскільки в рівнянні Бесселя замість p повинна стояти одиниця, то в (4) потрібно зробити заміну $\sqrt{p}r=t$, якщо $p>0$, і $\sqrt{-p}r=t$ у випадку $p<0$. В останньому випадку у загальному розв'язку (2.5) потрібно замість функцій Бесселя записати модифіковані функції $I_{\frac{n-2}{2}}(t)$ та $K_{\frac{n-2}{2}}(t)$.

Наслідок 1. Рівняння (1) в просторі E^n буде коливним, якщо $p>0$, і неколивним у випадку $p\le 0$, а загальний розв'язок відповідного рівняння (2) представляється формулами виду (5). Зауважимо, що використовуючи властивості функцій Бесселя, можна стверджувати, що умова неколивності $p\le 0$ буде і необхідною.

У випадку простору H^n маємо $A(r)=\omega_n\cdot sh^{n-1}r$, тоді:

$$\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{A'}{A}\right)^2-\frac{1}{2}\cdot\frac{A''}{A}=-\frac{1}{4}(n-1)^2-\frac{n^2-4n+3}{4\cdot sh^2 r}.$$

Отже, для визначення функції $\phi(r)$ отримуємо рівняння:

$$\phi''+\left(p-\left(\frac{n-1}{2}\right)^2-\frac{n^2-4n+3}{4\cdot sh^2 r}\right)\phi=0. \tag{6}$$

Наслідок 2. Рівняння (2.1) в просторі H^n буде неколивним, якщо

$$p-\left(\frac{n-1}{2}\right)^2\le 0.$$

Відмітимо, що в окремому випадку тривимірних просторів розв'язки рівнянь (2) можна виписати в явному виді як розв'язки рівнянь з постійними коефіцієнтами, використовуючи для цього канонічні рівняння для $M(r)$:

$$\begin{aligned} &\phi''+p\phi=0 && \text{для } E^n;\\ &\phi''+(p-1)\phi=0 && \text{для } H^n;\\ &\phi''+(p+1)\phi=0 && \text{для } S^n. \end{aligned} \tag{7}$$

Зокрема, рівняння (2) володіє фундаментальною системою розв'язків із властивостями:

а) $M_1(r)$ – обмежений у нулі розв'язок і $M_1(r)\to\infty$, коли $r\to\infty$;

б) $M_2(r)$ – необмежений у нулі розв'язок і $M_2(r)\to 0$, коли $r\to\infty$.

Такі загальні розв'язки рівняння (2) із використанням розв'язків (7) приймають вигляд:

$$\begin{aligned} &M(r)=\frac{c_1 sh\sqrt{-p}r+c_2 ch\sqrt{-p}r}{r}, && \text{для } E^n, \text{ якщо } p<0;\\ &M(r)=\frac{c_1 sh\sqrt{1-p}r+c_2 ch\sqrt{1-p}r}{sh\, r}, && \text{для } H^n, \text{ якщо } p-1<0;\\ &M(r)=\frac{c_1\sin\sqrt{1+p}r+c_2\cos\sqrt{1+p}r}{\sin r}, && \text{для } S^n, \text{ якщо } p+1>0. \end{aligned} \tag{8}$$

У випадку, коли нас цікавлять лише регулярні розв'язки, тоді в загальному розв'язку треба покласти $c_2=0$. Ця обставина враховується при встановленні умов коливності рівнянь із частинними похідними.

Зауваження 2. На відміну від еліптичного випадку, для рівнянь гіперболічного типу, коливність рівняння

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}-\Delta u+pu=0 \tag{9}$$

суттєво залежить від кількості змінних, зокрема, при *n=1* (звичайне диференціальне рівняння) на коливніть розв'язків впливає тільки знак числа p. Залежність існування коливних розв'язків (9) від розмірності (числа *n*) ілюструється на рис.1.

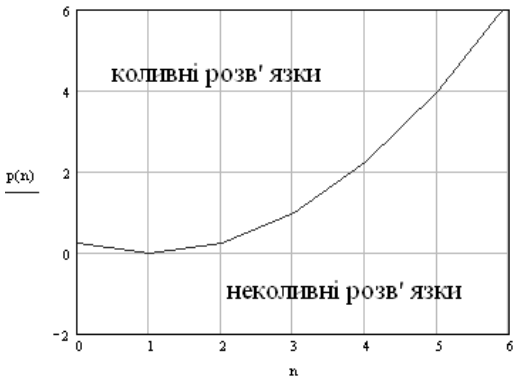


Рис. 1. Поле коефіцієнтів коливності і неколивності розв'язків рівняння (9)

Для простору S^n площа *n*-мірної сфери $A(r)=\omega_n\cdot\sin^{n-1}r$, тоді:

$$\frac{1}{4}\cdot\left(\frac{A'}{A}\right)^2-\frac{1}{2}\cdot\frac{A''}{A}=\frac{1}{4}(n-1)^2-\frac{n^2-4n+3}{4\cdot\sin^2 r}.$$

Рівняння для ознаки коливності (1) в просторі S^n має вид:

$$\phi'' + \left(p + \left(\frac{n-1}{2} \right)^2 - \frac{n^2 - 4n + 3}{4 \cdot \sin^2 r} \right) \phi = 0.$$

Наслідок 3. Умова $p + \left(\frac{n-1}{2} \right)^2 \le 0$ буде достатньою для неколивності рівняння (1) в просторі S^n.

При $p = 0$ розв'язки рівняння (2) представляються в явному виді:

$$M_r[u, P_0] = c_1 + c_2 \cdot \int_0^r A^{-1}(t) dt$$

і $M'_r[u, P_0] = \frac{1}{A(r)} > 0$ всюди на інтервалі $[r_0, \omega)$, $r_0 > 0$, а тому рівняння (1) є неколивним при $p \le 0$ для простору S^n.

Висновки. Геометричні заміри характеристик ЗПШ для різних наповнювачів композитів визначають різні по величині параметри *p* рівнянь (1-2), що у свою чергу визначають умови коливності у просторі геометричних параметрів таких шарів згідно рівностей (8) у відповідних просторах. Це у свою чергу надає можливість прогнозу фізико-механічних параметрів композитів а отже і експлуатаційних характеристик .

Література

1. Добротвор І.Г. Умови коливності розв'язків деяких класів рівнянь з оператором Лапласа-Бельтрамі в необмежених областях / І.Г. Добротвор // Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2015. – № 1 (12). – С. 208–214.
2. Stuhljak P., Dobrotvor I., Mytnyk M., Mykytyshyn A. Investigation of the phenomena revealed on phase interface in epoxide-composites // Przetworstwo tworzyw. Polymer processing. – 2017 (styczen-luty). – № 1 (175)/23. – p. 53–63.
3. Nowakowska W., Werbowski W. On connections between oscillatory solutions of functional, difference and differential equations // Fasciliculi mathematici. – 2010. – Nr 43. – P. 95–106.
4. Rongcong X., Younghui X. A note on the oscillation of second-order nonlinear neutral functional differential equations // Int. J. Contemp. Math. Sciences, – 2008. – Vol. 3, – no. 29. – P. 1441–1450.
5. Cakmak D. Oscillation criteria for nonlinear second order differential equations with damping / D. Çakmak // Укр. мат. журн. – 2008. – Т. 60. – № 5. – С. 694–700.
6. Thandapani E., Manju K. Oscillation criteria for second-order nonlinear impulsive differential equations with perturbation // International Journal of pure and applied mathematics. – 2014. – Vol. 94. – No. 2. – P. 163–174.
7. Grase S. R., Agarwal R.P., Bohner M., Pinelas S. Oscillation of some fourth-order difference equations // International Journal of difference equations. – 2011. – Vol. 6. – N. 2. – P. 105–112.

References

1. Dobrotvor I.H. Umovy kolyvnosti rozviazkiv deiakykh klasiv rivnian z operatorom Laplasa-Beltrami v neobmezhenykh oblastiakh / I.H. Dobrotvor // Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii : naukovyi zhurnal. – Kherson : Khersonska derzhavna morska akademiia. – 2015. – # 1 (12). – S. 208–214.
2. Stuhljak P., Dobrotvor I., Mytnyk M., Mykytyshyn A. Investigation of the phenomena revealed on phase interface in epoxide-composites // Przetworstwo tworzyw. Polymer processing. – 2017 (styczen-luty). – # 1 (175)/23. – p. 53–63.
3. Nowakowska W., Werbowski W. On connections between oscillatory solutions of functional, difference and differential equations // Fasciliculi mathematici. – 2010. – Nr 43. – P. 95–106.
4. Rongcong X., Younghui X. A note on the oscillation of second-order nonlinear neutral functional differential equations // Int. J. Contemp. Math. Sciences, – 2008. – Vol. 3, – no. 29. – P. 1441–1450.
5. Cakmak D. Oscillation criteria for nonlinear second order differential equations with damping / D. Çakmak // Ukr. mat. zhurn. – 2008. – T. 60. – # 5. – S. 694–700.
6. Thandapani E., Manju K. Oscillation criteria for second-order nonlinear impulsive differential equations with perturbation // International Journal of pure and applied mathematics. – 2014. – Vol. 94. – No. 2. – P. 163–174.
7. Grase S. R., Agarwal R.P., Bohner M., Pinelas S. Oscillation of some fourth-order difference equations // International Journal of difference equations. – 2011. – Vol. 6. – N. 2. – P. 105–112.

Рецензія/Peer review : 18.05.2017 р. Надрукована/Printed :11.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Марущак П.О.

УДК 628.38

Д.В. СТЕПАНОВ, Н.В. ПАЛАМАРЧУК, Ю. Я. СПРИНЧУК
Вінницький національний технічний університет

ТРИГЕНЕРАЦІЙНА БІОГАЗОВА УСТАНОВКА

Розглянуті варіанти використання біогазу. Проаналізовано доцільність використання біогазової тригенераційної установки на сільськогосподарському підприємстві для отримання органічних добрив, електроенергії, теплоти і холоду. Встановлено, що тригенерація дозволяє більш повно використовувати енергію біогазу протягом року, зменшити використання непоновлюваних джерел енергії – природного газу та електроенергії, отримати невеликі терміни окупності обладнання завдяки використанню «зеленого тарифу» продажу виробленої електроенергії. Запропоновано схему тригенераційної біогазової установки.

Ключові слова: тригенерація, абсорбційна холодильна машина, двигун внутрішнього згорання, біогазова установка, зелений тариф.

D.V. STEPANOV, N.V. PALAMARCHUK, Y.Y. SPRINCHUK
Vinnytsia National Technical University

THREEGENERATION BIOGAS PLANT

The aim of the study is to evaluate the feasibility and development of energy-efficient schemes threegeneration biogas plants for agricultural enterprises. Relevance of use of energy-efficient ecological clean anaerobic digestion of organic waste. With the purpose of increase of efficiency of biogas plants the analysis of the use of biogas is made. Advantages and disadvantages of the combustion of biogas in boilers, cogeneration and threegeneration plants and use of biogas as motor fuel and as an additive in the natural gas network. Analyzed the feasibility of using threegeneration biogas plants on farms is to produce organic fertilizer, electricity, heat and cold. It is established that the threegeneration makes better use of the energy of biogas during the year, reduce the use of non-renewable energy sources – natural gas and electricity, get a small payback period through the use of "green tariff" for the sale of electricity produced. The proposed scheme threegeneration biogas plants.

Keywords: threegeneration, absorption refrigerating machine, engine of internal combustion, biogas installation, green tariff

Вступ. Постановка задачі

У зв'язку з енергетичною кризою в Україні використання альтернативних джерел енергії є все більш актуальним, а анаеробна переробка тваринницьких відходів із виробництвом біогазу, який за своїми властивостями незначно поступається природному газу, є одним з найбільш економічно, енергетично та екологічно ефективних методів утилізації відходів. Такий метод переробки відходів дозволяє зменшити викиди в атмосферу метану та аміаку, закислення ґрунтів, покращити умови праці та енерговитрати господарства за рахунок використання виробленого енергоносія – біогазу.

Світова практика показує, що отриманий біогаз доцільно використовувати таким чином [1].

- Біогаз може застосовуватися на місці його виробництва у якості палива, для отримання теплової енергію за допомогою парових або водогрійних котлів.
- З біогазу можна виробляти електроенергію за допомогою теплових двигунів. У той же час можна використовувати відхідну теплоту яка при цьому утворюється. Тому біогаз дозволяє впровадити цікаві можливості для децентралізованого енергозабезпечення і являє собою альтернативу, зокрема, для аграрних підприємств в Україні.
- Біогаз, очищений до якості природного газу (біометану), може подаватися в загальну газорозподільну мережу [2]. На відміну від дорогих і неефективних можливостей накопичення перемінних резервів сонячної та вітрової енергії, газорозподільна мережа дозволяє майже без втрат поєднати виробництво і споживання енергії. Є практика використання отриманого з відходів та очищеного біогазу як моторного палива для вантажного та пасажирського транспорту. Це дасть можливість зменшити техногенне навантаження на навколишнє середовище.

Найпростішим та найбільш дешевим варіантом використання біогазу є його безпосереднє спалювання в топках котлів із виробництвом теплоти. Така технологія дозволяє повністю покривати потреби біогазової установки та всього господарства в теплоті протягом року. Але в літній період виникають значні надлишки теплоти, які доводиться викидати в навколишнє середовище. Сезонне акумулювання теплоти або біогазу на даний момент , на нашу думку, не є економічно доцільним.

Збагачення біогазу до біометану може підвищити якість енергоносія. При цьому збагачений біогаз може або використовуватися безпосередньо на місці, або подаватися в існуючу мережу природного газу. Суттєва перевага такого варіанта в порівнянні з іншими полягає у використанні наявної інфраструктури. Так, не потрібно створювати жодних нових систем зберігання. Існуючі мережі природного газу, що мають величезні потужності, пропонують ефективне і економічне рішення для зберігання біометану. Завдяки однаковій якості біометану і природного газу біометан може використовуватися в існуючих технічних приладах (побутових, промислових, транспортних).

Біометан є високоефективним пальним для транспортних засобів. При цьому біомаса, з розрахунку на 1 гектар посівної площі використовується особливо ефективно у порівнянні з іншими видами пального (біоетанол, біодизель або ріпакова олія). Біометан може вже сьогодні застосовуватися в усіх автомобілях на природному газі без значних технічних модифікацій.

Недоліком технології біометану для невеликих аграрних підприємств є відносно високі капітальні та експлуатаційні витрати на системи очищення біогазу від вологи, сірководню та вуглекислоти.

Застосування біогазу у децентралізованому енергопостачанні сприяє скороченню імпорту енергоносіїв та підвищенню надійності енергопостачання, зокрема, у сільській місцевості. Все більше і більше фермерських господарств у Європі будують біогазові установки в безпосередній близькості від свого господарства для забезпечення себе і довколишніх сіл електроенергією і теплотою. Крім того, залишки бродіння з реактора можуть використовуватися як високоякісне добриво у землеробстві. Завдяки постійно доступній сировині, біогаз, а отже електроенергія і теплота, можуть вироблятися протягом усього року і, таким чином, створюють додаткову економічну опору для багатьох фермерських господарств, що сприяє стабільності і розвитку вітчизняного сільського господарства.

Часто проблемою децентралізованого виробництва електроенергії і теплоти стає відсутність відведення теплоти, що утворюється. Тому до початку будівництва біогазової установки потрібно визначити потенційних споживачів тепла, аби підвищити загальну ефективність системи. Незважаючи на недостатнє тепловідведення в Німеччині за останні роки (цьому сприяв Закон про поновлювані джерела енергії – EEG) було побудовано багато установок, які служать в основному для децентралізованого виробництва електроенергії і випускають невикористану теплоту в навколишнє середовище.

Тригенерація це комбіноване виробництво електроенергії, теплоти і холоду. При цьому особливість тригенерації полягає в тому, що холод виробляється абсорбційною холодильною машиною, яка, в основному, споживає теплову енергію, а не електричну [3].

Тригенерація є більш вигідною в порівнянні з когенерацією, оскільки дає можливість ефективно використовувати утилізовану після двигуна внутрішнього згорання теплоту не лише взимку для опалення, але і влітку для кондиціонування приміщень або для потреб технологічного охолодження. З цією метою можна використовувати абсорбційні бромистолітієві холодильні установки. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати генерувальну установку цілий рік, тим самим не знижуючи високий коефіцієнт корисної дії енергоустановки в літній період, коли потреба в теплоті, яку виробляє таке устаткування, знижується.

Потенційним об'єктом для впровадження біогазових тригенераційних технологій є тваринницькі ферми. Тригенераційний комплекс дозволяє максимально знизити собівартість електроенергії, гарячого водопостачання, опалювання та охолоджування на об'єкті застосування.

Мета даної роботи – оцінювання доцільності та розробка схеми енергоефективної тригенераційної біогазової установки для сільськогосподарського підприємства.

Результати досліджень

За об’єкт дослідження було взято фермерське господарство «Щербич», Вінницької області Літинського району с. Багринівці. Поголів’я ферми складається з ВРХ 260 шт. та свиней 1800 шт., така кількість тварин дає змогу отримувати 1878,4 кубічних метри біогазу за добу [4], що заміщає собою 1181 кубічних метрів природного газу [5]. За рекомендаціями [6] розроблено та розраховано схему біогазової установки з використанням когенераційної установки. Також після одержання біогазу отримується велика кількість органічних добрив, що продаються або застосовуються в господарстві і призводять до значного підвищення врожайності культур [7]. При використанні такої схеми термін окупності проекту становить 2 роки [8].

Врахувавши, що на фермі крім вирощування тварин є виробництво м'ясо-молочної продукції було запропоновано використання тригенерційної установки з абсорбційною холодильною машиною [9], яка покриє значну частку споживання холоду господарством. На основі модернізації раніше запатентованої схеми [10] розроблена схема тригенераційної біогазової установки, показана на рис. 1.

Установка працює наступним чином. Свіжий субстрат завантажується з приймальної посудини 1 у змішувач 2 насосом 3, де він змішується із рідкою фракцією, що поступає з розділювача збродженого субстрату 4 під дією насоса рециркуляції рідкої фракції 5. Підготовлений у змішувачі 2 субстрат завантажується в біореактори 6. Отриманий в реакторах біогаз за допомогою компресора 7 подається у газгольдер 8 через гідрозатвор та осушувач отриманого біогазу, та фільтр для очищення від сірководню 9, звідки біогаз іде на двигун внутрішнього згорання 10, що виробляє електроенергію та теплоту. Вироблена в двигуні теплота за допомогою циркулюючої під дією насоса 11 води передається на теплообмінник систем обігріву 12, до абсорбційної холодильної машини 13 та, в разі необхідності, на градирню 14. Від теплообмінника систем обігріву 12 теплота з використанням циркуляційних насосів 15-18 передається до системи обігріву реакторів 6, змішувача 2, системи опалення приміщень, змійовика бака-акумулятора 3 системи гарячого водопостачання.

Зброджений субстрат з реактора 6 відводиться у розділювач 4, звідки відділена рідка фракція за допомогою насоса рециркуляції 5 повертається в змішувач 2, а згущений субстрат відводиться і використовується як добриво. Холод, отриманий в машині 13 використовується для попереднього охолодження молока, охолодження м’яса та кондиціювання молочного та м'ясозаготівельного цеху.

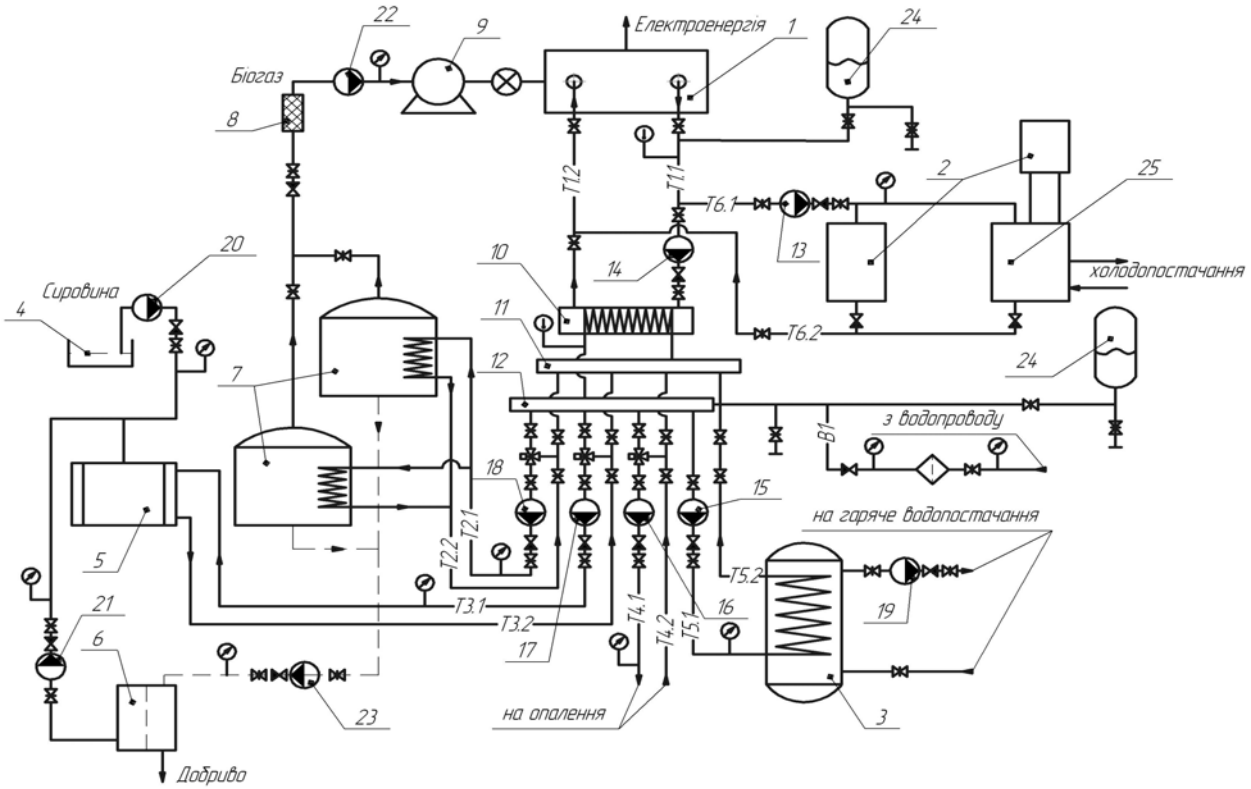


Рис. 1. Схема тригенераційної біогазової установки

Для даних умов є можливість отримання «зеленого тарифу» продажу електроенергії на енергоринок. Отримана з органічних відходів електроенергія має коефіцієнт до тарифу 2,30 [11]. Орієнтовні терміни окупності обладнання не перевищують 3–5 років. Крім того, впровадження тригенераційних систем дозволяє вирішити ряд екологічних, енергетичних та соціальних проблем. Тому, в цілому, можна зробити висновок про доцільність впровадження тригенераційних біогазових установок для малих та середніх тваринницьких господарств.

Висновки

Сучасний стан забруднення навколишнього середовища та стан, в якому знаходиться комунальна енергетика вимагає пошуку енергоефективних екологічно чистих методів переробки органічних відходів. Анаеробне зброджування сільськогосподарських відходів дозволяє отримати комплексний ефект: покращити екологічний стан навколо підприємств та умови праці, зробити господарство енергонезалежним, отримати високоякісні добрива.

Однією з невирішених проблем біогазових установок є недостатньо ефективне використання отриманого біогазу. В результаті аналізу шляхів утилізації біогазу виявлено, що одним з найбільш перспективних методів є використання тригенераційної установки, яка складається з двигуна внутрішнього згорання та абсорбційної холодильної машини. Таке обладнання дозволяє повністю покрити потреби господарства в теплоті і в значній мірі покрити потреби господарства у електроенергії та холоді.

Техніко-економічні розрахунки показують терміни окупності тригенераційних біогазових установок для невеликих тваринницьких підприємств на рівні 3–5 років, що підтверджує доцільність впровадження таких систем в Україні.

Література

1. Ткаченко С.Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки : монографія / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2004. – 132 с.

2. Біогазові установки [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.biteco-energy.com/biogazovye-ustanovki-3/

3. Степанов Д.В. Холодильна техніка та технологія : навчальний посібник / Д. В. Степанов, Н. Д. Степанова – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 95 с.

4. Баадер В. Биогаз: Теория и практика / Баадер В., Доне Е., Брендерфер М. – М. : Колос, 1982. – 148 с.

5. Биомасса как источник энергии / [пер. с англ. ; под ред. С. Соуфера, О. Заборски]. – М. : Мир, 1985. – 368 с.

6. Ткаченко С.Й. Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел теплопостачання : навч. посібник / С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, Д. В. Степанов. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 137 с.

7. Карп И. Н. Экономические показатели использования различных видов топлив в энергетике / И. Н. Карп, А. В. Степанов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. – № 4. – С. 3–6.

8. Лялюк О.Г. Техніко-економічне обгрунтування вибору біогазової установки [Електронний ресурс] / О.Г. Лялюк, Ю.Я. Спринчук // Тези доповідей 46 Науково-технічної конференції ВНТУ. – Режим доступу : https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/1943/1863

9. АБХМ на горячей воде [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://abxm-thermax.ru/abxm/abxm-na-goryachej-vode

10. Патент України на корисну модель № 80552, МПК7 C02F11. Установка для виробництва енергоносіїв з органічних відходів / Степанов Д. В., Ткаченко С.Й., Степанова Н. Д. Промислова власність. – К. : Український інститут промислової власності. – опубл. 10.06.2013 р., бюл. № 11.

11. Про внесення зміни до Закону України "Про електроенергетику" щодо коефіцієнтів "зеленого" тарифу для електроенергії, виробленої з використанням альтернативних джерел енергії : закон України 1804-19 від 22.12.2016 р. // Відомості Верховної Ради. – 2017. – № 4. – Ст. 47.

References

1. Tkachenko S.Y. Teploobminni ta hidrodynamichni protsesy v elementakh enerhozabezpechennia biohazovoi ustanovky : monohrafiia / S. Y. Tkachenko, D. V. Stepanov. – Vinnytsia : UNIVERSUM–Vinnytsia, 2004. – 132 s.

2. Biohazovi ustanovky [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.biteco-energy.com/biogazovye-ustanovki-3/

3. Stepanov D.V. Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia : navchalnyi posibnyk / D. V. Stepanov, N. D. Stepanova. – Vinnytsia : VNTU, 2008. – 95 s.

4. Baader V. Byohaz: Teoryia y praktyka / Baader V., Done E., Brenderfer M. – M. : Kolos, 1982. – 148 s.

5. Byomassa kak ystochnyk enerhyy / [per. s anhl. ; pod red. S. Soufera, O. Zaborsky]. – M. : Myr, 1985. – 368 s.

6. Tkachenko S.Y. Rozrakhunky teplovykh skhem i osnovy proektuvannia dzherel teplopostachannia : navch. posibnyk / S. Y. Tkachenko, M. M. Chepurnyi, D. V. Stepanov. – Vinnytsia : VNTU, 2005. – 137 s.

7. Karp Y. N. Ekonomycheskye pokazately yspolzovanyia razlychnykh vydov toplyv v enerhetyke / Y. N. Karp, A. V. Stepanov // Ekotekhnolohyy y resursosberezhenye. – 1999. – # 4. – S. 3–6.

8. Lialiuk O.H. Tekhniko-ekonomichne obhruntuvannia vyboru biohazovoi ustanovky [Elektronnyi resurs] / O.H. Lialiuk, Yu.Ya. Sprynchuk // Tezy dopovidei 46 Naukovo-tekhnichnoi konferentsii VNTU. – Rezhym dostupu : https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2017/paper/view/1943/1863

9. ABKhM na horiachei vode [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://abxm-thermax.ru/abxm/abxm-na-goryachej-vode

10. Patent Ukrainy na korysnu model # 80552, MPK7 S02F11. Ustanovka dlia vyrobnytstva enerhonosiiv z orhanichnykh vidkhodiv / Stepanov D. V., Tkachenko S.Y., Stepanova N. D. Promyslova vlasnist. – K. : Ukrainskyi instytut promyslovoi vlasnosti. – opubl. 10.06.2013 r., biul. # 11.

11. Pro vnesennia zminy do Zakonu Ukrainy "Pro elektroenerhetyku" shchodo koefitsiientiv "zelenoho" taryfu dlia elektroenerhii, vyroblenoi z vykorystanniam alternatyvnykh dzherel enerhii : zakon Ukrainy 1804-19 vid 22.12.2016 r. // Vidomosti Verkhovnoi Rady. – 2017. – # 4. – St. 47.

Рецензія/Peer review : 06.06.2017 р. Надрукована/Printed :20.8.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ткаченко С.Й.

УДК 620.92:338.45

Л.В. НАКАШИДЗЕ, Т.В. ГІЛЬОРМЕ
Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, У ЯКИХ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

У роботі наведено технічні та економічні чинники, які необхідно враховувати при комплексному техніко-економіному розгляді конструкційних елементів систем енергозабезпечення, у яких використовується енергія відновлюваних джерел. Враховуються як теплотехнічні аспекти конструкції енергоактивних огороджень, так і економічні чинники максимзування економічного ефекту впровадження інноваційних систем енргозбезпечення.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, енергоактивні огородження, повітряний прошарок, коефіцієнт теплопровідності, математична модель, максимізація економічного ефекту.

L. V. NAKASHYDZE, T. V. HILORME
Dnipropetrovs'k national university named after Oles Gonchar

TECHNICAL AND ECONOMIC SUBMISSION OF IMPLEMENTATION OF ENERGY SYSTEMS IN WHICH RENEWABLE ENERGY SOURCES ARE USED

The paper presents the technical and economic factors that are necessary to take into account in the complex technical and economic consideration of the structural elements of energy supply systems that use renewable energy sources. The heat engineering aspects of the design of energy-active fences are considerated as well as economic factors of maximizing the economic effect of the introduction of innovative systems of industrial maintenance. Implementation of power supply systems with energy-efficient fences is an important factor in the development of the energy sector for the implementation of renewable energy sources, which contributes to the country's social stability.

Keywords: renewable energy sources, energy-active fences, air layer, coefficient of thermal conductivity, mathematical model, maximization of economic effect.

Вступ

В Україні та світі важливим аспектом сталого економічного та технічного розвитку галузі енергозабезпечення є розвиток технологій, які сприяють енергозаощадженнню викопного органічного палива (газ, вугілля, нафта). Такі іноваційні технології передбачають використання енергії відновлюваних джерел – енергія сонячного випромінювання, тепла навколишнього середовища, вітрового потенціалу та ін. Інтенсивний розвиток передбачений у таких документах, як «Енергетична стратегія України на період до 2030 р.» та іншим законодавчим документам [1–4]. Нова редакція Директиви Європейського Союзу про енергетичну ефективність будівель вказує на заходи, впровадження яких дозволить наблизити сферу послуг енергозабезпечення до вимог європейських країн. Одним з актуальних напрямів є впровадження систем енегозабезпечення з мінімальним споживанням енергії. Впровадження технологій використання відновлюваних джерел енергії дозволить комплексно вирішити технічні екологічні, екологічні та соціальні аспекти, які наявні в галузі енергозабезпечення та енергоспоживання.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Наявні технології сонячного опалення та охолодження, що застосовуються в житлових і комерційних будівлях, являють собою сформований ринок. В Європі відповідний обсяг ринку збільшився більш ніж у три рази за останній час. Наприклад, у Німеччині в невеликих будівлях доля використання енергії сонячного випромінювання у вказаних вище системах не перевищує 15 %. На цьому ринку починають домінувати вакуумні колектори, які на сьогодні є конструктивно і технологічно довершеними і придатними для масового виробництва. Важливі виробничі майданчики вакуумних колекторів знаходяться в країнах Європі, Туреччині, Бразилії, Китаї та Індії. Разом з тим розвивається експорт комплексних геліоводопідігрівальних систем. Найбільшими експортерами таких систем є Австралія, Греція, США і Франція [3–6].

Техніко-економічні показники застосування енергії відновлюваних джерел залежать від сформованого контруктивного рішення системи енергозабезпечення (відповідно до потреб та економічних можливостей споживача).

Інвестиційні витрати на сонячні системи теплопостачання значною мірою відрізняються залежно від складності застосовуваної технології, а також ринкових умов у країні їх експлуатації. Витрати для інноваційних систем водопостачання змінюються в діапазоні від низьких показників 83 у.о./м^2 до 1200 у.о./м^2 (для деяких систем опалення приміщень). Нормована вартість тепла відображає широкий діапазон коливань інвестиційних витрат і залежить від більшого числа змінних величин, включаючи конкретний тип системи, інвестиційні витрати на дану систему, наявне в конкретному місці сонячне випромінювання, ефективність перетворення даної системи, оперативні витрати, стратегії використання системи і дисконтна ставка [7]. Нормована вартість тепла для сонячних теплових систем з урахуванням широкого діапазону вихідних параметрів була розрахована в широко мінливих межах від 9 до 200 у.о./ГДж. Нормована вартість тепла знаходиться в межах від 30 у.о./ГДж до 50 у.о./ГДж в регіонах насамперед деяких районів Центральної і Південної Європи, і доходить майже до 90 у.о./ГДж в регіонах з меншим сонячним випромінюванням. За останнє десятиліття на кожні 50 % збільшення встановленої потужності сонячних нагрівачів води в Європі інвестиційні витрати скоротились на 20 % [7]. Тенденція до зниження вартості систем енергозабезпечення досягається за рахунок використання більш дешевих матеріалів, більш

ефективних виробничих процесів, масового виробництва і безпосереднього включення в конструкцію будівель колекторів в якості багатофункціональних будівельних компонентів і модульних систем, які легко встановлюються. Зниження вартості є ключовою проблемою, пов'язаною з тим, щоб пряма сонячна енергія стала більш вигідною в комерційному плані і змогла претендувати на більшу частку на світовому енергетичному ринку. Потенційне використання залежить від фактичних ресурсів і наявності відповідної технології. У той же час чинна нормативно-правова основа може значною мірою сприяти або стримувати поширення застосування прямої сонячної енергії. Транспарентні й оптимізовані адміністративні процедури, пов'язані зі встановленням і підключенням джерела сонячної енергії до існуючих мережевих інфраструктур, можуть також знизити витрати на пряму сонячну енергію.

У багатьох країнах розвиток систем енергопостачання протягом десятиліть дав можливість забезпечувати дієвий і економічно ефективний розподіл електроенергії, газу і тепла, а також транспортування енергоносіїв для надання корисних енергетичних послуг кінцевим споживачам [8]. Посилена інтеграція може призвести до того, що повний набір енергетичних послуг для великих і малих населених пунктів як у розвинених, так і в країнах, що розвиваються, буде заснований на відновлювальних джерелах енергії. Системи енергопостачання постійно розвиваються з метою збільшення ефективності технологій перетворення енергії відновлювальних джерел.

Використання у спорудах комплексних систем енергозабезпечення, до складу яких входять теплові насоси, теплові акумулятори, енергоактивні огородження, є результатом пошуку шляхів найбільш економічних засобів енергозбереження та рекуперації енергетичних потоків об'єктів. Впровадження таких систем сприяє поширенню технічного забезпечення виробництва енергії безпосередньо на об'єкті. Такі системи здатні частково або повністю замінити енергію, що генерується традиційними засобами енергозабезпечення [9].

Тільки завдяки комплексному врахуванню технічних, технологічних, екологічних та ін. аспектів можна розв'язати господарську та науково-технічну проблему скорочення споживання традиційних паливно-енергетичних ресурсів.

Входження України в європейську зону зобов’язує до прийняття загальноєвропейських правил стосовно підвищення енергоефективності будівель і шляхів їх реалізації. Спрямованості на ефективне використання енергоресурсів сприяють інноваційні технічні рішення, розроблені іноземними та вітчизняними вченими [6]. Серед них – інтелектуальна технологія EIB/KNX компанії «ЭкоПрог», що дозволяє оптимізувати всі складові процесу енергозбереження.

Спеціалістами компанії Dimplex розроблені системи теплозабезпечення з використанням енергозабезпечення на основі теплових насосних систем. Використання цих розробок дозволяє скоротити загальний об’єм газу в два рази. При цьому можуть використовуватись теплові насоси різних розробників та виробників, наприклад теплові насоси Waterkotte (Німеччина), IDM (Австрія), NIBE (Швеція), Menergy (Canada) та ін.

Проблему підвищення ефективності витрат енергії на забезпечення оптимального теплового режиму різних споруд пропонується шляхом впровадженням комплексного використання новітніх ресурсозберігаючих технологій у вигляді енергоактивних огороджень, теплових насосів, ґрунтових акумуляторів тепла та відновлювальних джерел енергії [10, 11].

Мета та задачі дослідження

Робота направлена на розробку науково обґрунтованих техніко-економічних заходів підвищення ефективності систем кліматизації споруд за рахунок комплексного використання у схемних рішеннях енергозабезпечення споруд теплових насосів, теплових акумуляторів та енергоактивних огороджень як основних елементів перетворювання відновлюваних джерел енергії, перерозподілу отриманих енергетичних потоків.

Метою роботи є техніко-економічне обґрунтування підвищення ефективності систем енергозабезпечення, у яких в якості енергоносія використовуються відновлювані джерела енергії, а як системи перетворювання – енергоактивні огородження.

Задачами є:

- розробка системного підходу до розгляду структури матеріалу та конструкції енергоактивного огородження в системі енергозабезпечення
- техніко-економічні особливості обгрунтування енергозберігаючих рішень за умови максимізації економічного ефекту їх впровадження.

Техніко-економічні особливості використання енергоактивних огороджень

Ефективність конструктивного рішення та використання в спорудах енергоактивних огороджень (перетворення енергії відновлюваних джерел енергії з одночасним перерозподілом енергетичних потоків) обумовлюється рядом фізико-технічних факторів, які необхідно враховувати ще на етапі проектування. Серед них такі особливості, як побудова прошарки енергоактивного огородження [11, 8].

Основними є теплотехнічні особливості наявних в конструкції енергоактивного огородження прошарків, у першу чергу повітряних. Наприклад, достатній рівень від повітропроникнення та забезпечення необхідних теплотехнічних властивостей завдяки повітряним прошаркам розглядається на етапі вибору необхідних матеріалів, з яких буде побудовано енергоактивне огородження. Пропонується використовувати системний підхід до розгляду конфігурації відповідних порожнин у структурі вибраного матеріалу.

Функціональне використання енергоактивних огороджень в якості конструкції для захисту споруди від перегріву в теплу пору року менш ефективне ніж використання їх в якості термоізоляції в холодну пору року. Підвищити завдяки наявності енергоактивних огороджень рівень захисту споруди від перегріву в теплий період року можливо при використанні прошарків, що вентилюються в нічний час зовнішнім повітрям.

Позитивним ефектом наявності в енергоактивному огородженні повітряних прошарків є те, що таким конструкціям притаманна менша вологістна інерція порівняно із суцільною конструкцією.

Енергоактивні огородження набувають додаткові теплозахисні властивості при незначній вологості матеріалу, що використовується [7, 11]. Для цього конструктивно передбачається наявність сполучення вентильованих та замкнутих прошарків для можливості проведення процесу сушки внутрішніх прошарків енергоактивного огородження. Підвищення вологості матеріалу внутрішніх прошарків енергоактивного огородження призводить до втрати теплофізичних якостей використаних матеріалів і зменшення терміну їх експлуатації.

Для підвищення термічного опору повітряних прошарків в енергоактивних огородженнях доцільно використання прошарку, який виконаний з матеріалу, що має відбивальні властивості. Доцільність такого конструктивного прошарку обумовлена тим, що в енергоактивному огородженні передача тепла через повітряні прошарки великою мірою залежить від випромінювання. Це дозволить з більшою ефективністю проводити експлуатацію конструкції в різних природних умовах, у тому числі при різному рівні надходження сонячного випромінювання, при різному рівні вологості навколишнього середовища та ін.

Але при розгляді конструктивних особливостей побудови енергоактивного огородження необхідно враховувати те, що використання прошарку з відбивальними властивостями найбільш ефективне в горизонтальних замкнених повітряних прошарках, при направленні потоку тепла зверху вниз, тобто у випадку, коли конвекція практично відсутня і предавання тепла проходить в основному шляхом випромінювання [8, 13].

Визначено, що доцільним є використання відбивального прошарку на конструктивній поверхні, яка створює повітряний прошарок тільки з однієї сторони. Але вимогою до такої поверхні є відсутність появи конденсату (це призводить до зменшення відбивальних властивостей ізоляційного прошарку), тобто вона повинна мати змогу найбільш прогріватися.

Впровадження запропонованих іноваційних технічних рішень, в тому числі енергоактивних огороджень, дозволить отримати не тільки позитивні технічні переваги генерованої енергії, а й соціально-економічний позитивний ефект всієї енергетичної системи. Одержаний соціально-економічний ефект від впровадження заходів з енергозбереження, в тому числі енергоактивних огороджень, формалізовано можливо визначити [13]:

$$\begin{cases} E_{soc-ec} = EV_{сценар} - EV_{факт}, \\ EV = \overline{A}_{річ} + G, \\ G = \Pi_{чист} - (\overline{A}_{річ} \times H_A). \end{cases} \quad (1)$$

де EV – соціально-економічний ефект від впровадження заходів з енергозбереження, грн;

$EV_{сценар}, EV_{факт}$ – відповідно соціально-економічний ефект від впровадження заходів з енергозбереження сценарного та фактичного, грн;

G – сума гудвілу на основі оцінки за фактичною сумою прибутку, грн;

$\Pi_{чист}$ – середньорічна сума чистого прибутку, грн;

A – середньорічна вартість активів, грн;

H_A – норма рентабельності активів, частка.

Відбір конструктивних рішень енергоактивних огороджень, а також схемних рішень іноваційних систем енергозабезпечення пропонується проводити з урахуванням максимізації економічного ефекту (проводиться на основі побудови математичної моделі) [14]:

$$\begin{cases} LCC_i < B_t, \\ E_i^{Ec} + E_i^S + CoD_i > LCC_i, \\ при\ умовах: LCC_i \to \min, \\ E_i^{Ec}, E_i^S, CoD_i \to \max, \end{cases} \quad (2)$$

де LCC_i – витрати «часу життя» *i*-го проекту з енергозбереження, грн;

B_i – бюджет на реалізацію проектів з енергозбереження у *t*-му році, грн;

E_i^{Ec} – екологічних ефект, що пов'язаний з реалізацією *i*-го проекту з енергозбереження, грн;

E_i^S – соціальний ефект, що пов'язаний з реалізацією *i*-го проекту з енергозбереження, грн;

CoD_i – вартість відкладених рішень, що пов'язані з реалізацією *i*-го проекту з енергозбереження, грн.

Пропонується, також, врахувати вартість відкладених рішень і відхилення від витрат. Необхідно розкрити особливості показника розрахунку часу для повернення інвестицій в енергозберігаючі проекти – витрати «часу життя» (проекту) (*LCC*). Саме показник *LCC* представляє собою темпоральну складову оцінки капіталовкладень енергозберігаючих проектів. Включення всіх витрат та заощаджень, які витрачені протягом «часу життя» обладнання, надає більш релевантну інформацію при оцінки рентабельності проектів.

Витрати «часу життя» (проекту) розраховуються за формулою [15]:

$$LCC = I - S + M + R + E, \quad (3)$$

де *I* – капітальні витрати (інвестування);

S – ліквідаційна вартість;

M – витрати на експлуатацію;

R – витрати на заміну;

E – витрати на енергію.

Наведена формула враховує ліквідаційну вартість, строк служби обладнання, податки, відсоток та ін. Врахування ліквідаційних витрат має суттєве значення: по-перше, використання різних методів амортизації відповідно до П(С)БО 7 «Основні засоби» по-різному формує суми річних амортизаційних відрахувань; по-друге, особливості строків експлуатації обладнання при різних альтернативних джерел потребує різних підходів до формування ліквідаційної вартості об'єктів основних засобів тощо. Тобто при розрахунку собівартості одиниці електроенергії необхідно врахувати ліквідаційні витрати за рік. *LCC* – це трудомісткий розрахунок, але всі зусилля підприємства виправдані у випадку великих покупок та/або в умовах обмеженого капіталу. Витрати «часу життя» (*LCC*) допомагають оцінити чистий прибуток за час експлуатації проекту з урахуванням всіх основних витрат і заощаджень протягом терміну служби устаткування, дисконтованих до поточної вартості грошей. Так, додаткові питання (розрахунок дисконтованої вартості, факторів і норм дисконтування, *LCC*) вимагають детального аналізу.

Вартість відкладених рішень враховують потенційні заощадження, що дорівнюють таким же потенційним втратам, якщо підприємство не застосовує енергозберігаючі технології [15]:

$$CoD = -(E_n + O\&M_n) + I, \tag{4}$$

де *CoD* – вартість відкладених рішень;

E_n – заощадження витрат за енергію за період часу;

$O\&M_n$ – заощадження витрат на обслуговування і експлуатацію за період часу проекту.

Процедури та методи аналізу інвестиційної привабливості спрямовані на визначення альтернатив і співставлення варіантів реалізації проекту за критерієм енергоефективності. Комплексну економічну ефективність при прийнятті рішення щодо вибору інноваційної системи енергозабезпечення, в тому числі з використанням енергоавтиного огородження, математично можливо визначити як [14]:

$$E_{en} = \frac{\sum_{n=1}^{N}(W_0 - W_1)\times c_n + E^{Es} + E^{s} + CoD + \Delta P_{rep}^{perm}}{LCC + P_{cred} + D_{eq}}, \tag{5}$$

де E_{en} – економічний ефект від впровадження проекту з енергозбереження, частка;

W_0, W_1 – обсяг річного споживання *n-го* енергоресурсу відповідно до та після реалізації проекту з енергозбереження, кВт · год (Гкал, м^3, т.у.п.);

c_n – вартість одиниці *n-го* енергоресурсу, грн;

ΔP_{rep}^{perm} – зміна вартості планових поточних ремонтів, профілактичних оглядів та обслуговування, грн;

P_{cred} – виплата відсотків за позикою, грн;

D_{eq} – витрати, пов'язані з простоєм виробничих потужностей підприємства, що обумовлено реалізацією проекту з енергозбереження, грн.

Щодо екологічного та соціального ефектів, які пов'язані з реалізацією *i-того* проекту з енергозбереження, у тому числі впровадження енергоактивних огороджень, то можливо виділити інтернальні та екстернальні ефекти. Так, інтернальні екологічний ефект – це зменшення суми екологічних платежів, скорочення екологічних збитків підприємств; соціальний – збільшення рівня умотивованості персоналу щодо проблем енергозбереження, зменшення виплат по випадкам виробничого травматизму тощо. Екстернальний ефект синергується з складників сукупних ефектів: соціальний, екологічний, економічний як результат підвищення капіталізації, ринкової вартості, конкурентоспроможності, безпеки суб'єкта господарювання на засадах взаємодії стейкхолдерів системи впровадження систем енергозбереження.

Висновки

Впровадження систем енергозабезпечення з енергоактивними огородженнями є важливим чинником розвитку енергетичної сфери впровадження відновлюваних джерел енергії, що сприяє соціальній стабільності країни. Насамперед, це пов'язано з соціально-економічною доцільністю запровадження заходів з енергозбереження – соціально-економічним ефектом для бізнесу: поліпшення громадської думки, капіталізація через зростання гудвілу, позитивний імідж, підвищення лояльності споживачів.

Література

1. Унаспеков Б. А. Энергосбережение в тепловых пунктах жилых и общественных зданий. ч. 1. Общая модель теплового пункта / Б.А. Унаспеков, К.О. Сабденов, М.Ж. Кокарев, М.В. Колобердин, Б.А. Игембаев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. № 4. – С. 31–36.

2. Маляренко В. А. Возможности интеграции электроэнергии в системах горячего водоснабжения ЖКХ / В.А. Маляренко, И.Е. Щербак, И.Д. Колотило. Л.В. Лысак // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2014. – № 3(121). – С. 53–58.

3. Ганжа А.Н. Выбор рациональных параметров отпуска теплоты от источника системы

теплоснабжения / А.Н. Ганжа, В.Н. Подкопай // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – № 8 (114). – С. 8–14.

4. Ливчак В. И. Энергосбережение в системах централизованного теплоснабжения на новом этапе развития / В. И. Ливчак // Энергосбережение. – 2000. – № 2. – С. 4–9.

5. Шарапов В. И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П. В. Ротов. – М. : Издательство «Новости теплоснабжения», 2007. – 164 с.

6. Carbonell Daniel. Simulations of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems for Domestic Hot Water and Space Heating / Daniel Carbonell, Michel Y. Haller, Daniel Philippen, Elimar Frank // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 48. – P. 524–534.

7. Накашидзе Л.В. Формування складу системи енергозабезпечення, яка використовує енергію альтернативних джерел / Л.В. Накашидзе, В.О. Габрінець // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск: ПДАБА, 2016. – Вып. 87. – С. 84–92.

8. Накашидзе Л.В. Функционирование энергоактивного ограждения с тепловым насосом в системах энергообеспечения / Л. В. Накашидзе, В.А. Габринец // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Днепропетровск : ПДАБА, 2016. – Вып. 91. – С. 90–97.

9. Смирнов С. О. Маркетингове просування енергозберігаючих технологій використання альтернативних джерел енергії в Україні : монографія / С. О. Смирнов, С. Я. Касян, Л. В. Накашидзе, Т. В. Гільорме. – Дніпропетровськ : ПП «Ліра ЛТД», 2015. – 145 с.

10. Накашидзе Л. В. Основні вимоги до енергоактивних огороджень / Л. В. Накашидзе // Відновлювана енергетика. – К. : ІВЕ НАН України, 2013. – № 1. – С. 48–51.

11. Габрінець В. О. Формування схемних рішень системи кліматизації споруд в робочому середовищі альтернативних джерел енергії : монографія / В. О. Габрінець, Л.В. Накашидзе, Г. І. Сокол, О. Л. Марченко, Т. В. Гільорме. – Дніпро : ТОВ «АКЦЕНТ ПП», 2016. – 150 с.

12. Ильинский В.М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий) : уч. пособие для инж-строит. вузов. – М. : «Высшая школа», 1974. – 320 с.

13. Гільорме Т.В. Удосконалення методики проведення енергетичного аудиту суб'єктів господарювання / Т.В. Гільорме, Л.Ю. Гордєєва-Герасимова, М.О. Михалочкіна // Економіка. Фінанси. Право. – 2017. – № 6. – С. 42–44.

14. Гільорме Т.В. Методичні засади ефективної діяльності підприємства в сфері енергозбереження / Т. В. Гільорме // Управління енергозберігаючими технологіями в Україні та світі: методологія та практика : колективна монографія / за заг. ред. Л.М. Бандоріної. – Дніпро : Пороги, 2017. – С. 162–174.

15. Хэнсен Ш. Перфоманс – контрактинг: новые горизонты / Ш. Хэнсен, Дж. Вейсман // Энергоаудитиэнергосервис. – 2013. – № 2(26). – С. 4–11.

References

1. Unaspekov B. A. Energosberezhenye v teplovyx punktax zhylyx i obshhestvennyx zdanyj. ch. 1. Obshhaya model teplovogo punkta / B.A. Unaspekov, K.O. Sabdenov, M.Zh. Kokarev, M.V. Koloberdy`n, B.A. Ygembaev // Izvestyya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. – 2012. – T. 321. # 4. – C.31-36.

2. Malyarenko V. A. Vozmozhnosti integracii elektroenergii v sistemax goryachego vodosnabzheniya ZhKX / V.A. Malyarenko, Y.E. Shherbak, Y.D. Kolotilo. L.V. Lysak // Energosberezheniye, energetika, energoaudit. – 2014. – #3(121). – S.53-58.

3. Ganzha A. N. Vybor racional`nyx parametrov otpuska teploty ot istochnika sistemy teplosnabzheniya / A.N. Ganzha, V.N. Podkopaj // Energosberezheniye, energetika, energoaudit. – 2013. – #8 (114). – S.8-14.

4. Livchak V. Y. Energosberezheniye v sistemax centralizovannogo teplosnabzheniya na novom etape razvitiya / V. Y. Livchak // Energosberezheniye. – 2000. – # 2. – S. 4–9.

5. Sharapov V. Y. Regulirovaniye nagruzki sistem teplosnabzheniya / V.Y. Sharapov, P. V. Rotov. – M: Izdatel`stvo «Novosti teplosnabzheniya», 2007. – 164 s.

6. Carbonell Daniel. Simulations of Combined Solar Thermal and Heat Pump Systems for Domestic Hot Water and Space Heating / Daniel Carbonell, Michel Y. Haller, Daniel Philippen, Elimar Frank // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 48. – P. 524–534.

7. Nakashydze L.V. Formuvannya skladu systemy energozabezpechennya, yaka vykorystovuye energiyu alternatyvnyx dzherel / L.V. Nakashydze, V.O. Gabrinecz // Stroitelstvo, materialovedeniye, mashynostroeniye. – Vyp. 87. – Dnepropetrovsk: PDABA, 2016. – S.84-92.

8. Nakashydze L.V. Funkcyonirovaniye energoaktivnogo ograzhdeniya s teplovym nasosom v sistemax energoobespecheniya / L. V. Nakashydze, V.A. Gabrinecz // Stroitelstvo, materialovedeniye, mashynostroeniye. – Vyp. 91. – Dnepropetrovsk: PDABA, 2016. – S.90-97.

9. Smyrnov S. O. Marketyngove prosuvannya energozberigayuchyx texnologij vykorystannya alternatyvnyx dzherel energiyi v Ukrayini: Monografiya / S. O. Smyrnov, S. Ya. Kasyan, L. V. Nakashydze, T. V. Gil`orme. – Dnipropetrovs`k: PP «Lira LTD», 2015. – 145 s.

10. Nakashydze L. V. Osnovni vymogy do energoaktyvnyx ogorodzhen / L. V. Nakashydze // Vidnovlyuvana energetyka. – #1. – K.: IVE NAN Ukrayiny`, 2013. – S. 48-51.

11. Gabrinecz V. O. Formuvannya sxemnyx rishen systemy klimatyzaciyi sporud v robochomu seredovyshhi alternatyvnyx dzherel energiyi: monografiya / V. O. Gabrinecz, L.V. Nakashydze, G. I. Sokol, O. L. Marchenko, T. V. Gil`orme. – Dnipro: TOV «AKCENT PP», 2016. – 150 s.

12. Ilyinskyj V.M. Stroitelnaya teplofizika (ograzhdayushhie konstrukcii i mikroklimat zdanij). Uch. Posobiye dlya inzh-stroit. Vuzov. – M.: «Vysshaya shkola», 1974 – 320 s.

13. Gil`orme T.V. Udoskonalennya metodyky provedennya energetychnogo audytu subyektiv gospodaryuvannya / T.V. Gil`orme, L.Yu. Gordyeyeva-Gerasymova, M.O. Myxalochkina // Ekonomika. Finansy. Pravo. – 2017. – #6. – S. 42-44.

14. Gil`orme T.V. Metodychni zasady efektyvnoyi diyal`nosti pidpryyemstva v sferi energozberezhennya / T. V. Gil`orme // Upravlinnya energozberigayuchymy texnologiyamy v Ukrayini ta sviti: metodologiya ta praktyka: kolektyvna monografiya / za zag. red. L.M.Bandorinoyi. – Dnipro: Porogy, 2017. – S. 162-174.

15. Xensen Sh. Perfomans – kontrakting: novye gorizonty / Sh. Xensen, Dzh. Vejsman // Energoaudyty energoservis. – 2013. – # 2(26). – S. 4–11.

Рецензія/Peer review : 18.07.2017 р. Надрукована/Printed :08.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Габрінець В.О.

УДК 614.841.33

Л.Б. ДЕМИДЧУК, Д.І. САПОЖНИК
Львівський торговельно-економічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРО- ТА ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ ПОВЕРХНЕВОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ

В роботі досліджено питання щодо можливості підвищення температуро- та вогнестійкості залізобетонних конструкцій шляхом поверхневого оброблення захисними покриттями, закономірності процесів формування структуроутворюючого каркасу силіційорганічних сполук на основі наповнених поліметилфенілсилоксанів та можливості розроблення ефективних методів їх використання з врахуванням рецептур вихідних композицій для температуро- і вогнестійких захисних покриттів будівельних конструкційних матеріалів та визначено умови формування вогнезахисного покриття на поверхні залізобетонних конструкцій. Запропоновано склади вихідних композицій для захисних покриттів та вивчено їх вплив на вогнестійкість та довговічність залізобетонних конструкцій в умовах високотемпературного нагрівання та пожежі.

Ключові слова: температуро- та вогнестійкість покриття, вихідна композиція, залізобетонна конструкція вогнестійкість.

L.B. DEMYDCHUK, D.I. SAPOZHNIK
Lviv University of Trade and Economics

INCREASE OF TEMPERATURE AND FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY SURFACE TREATMENT WITH PROTECTIVE COATINGS

The problem of the possibility of increasing the temperature and fire resistance of reinforced concrete structures by surface treatment with protective coatings, regularities of the processes of formation of the structure-forming framework of organosilicon compounds on the basis of the filled polymethylphenylsiloxanes and the possibility of developing effective materials and the conditions for the formation of fire protection coating on the surface of reinforced concrete structures have been determined. The composition of the initial compositions for protective coatings was proposed and their influence on fire resistance and durability of reinforced concrete structures in conditions of high temperature heating and fire was studied.

Keywords: temperature and fire resistance of coating, initial composition reinforced concrete fire resistance.

Постановка проблеми

Нормативними документами України (ДБН В.1.1.7−2016) [1] встановлено, що межа вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій визначається розрахунковим методом або шляхом вогневих випробувань та повинна складати не менше 45 хв. З урахуванням сучасних технологій будівництва, а саме зменшення перерізу основних будівельних залізобетонних конструкцій, для забезпечення необхідної межі вогнестійкості доцільно використовувати вогнезахисні покриття.

В реальних умовах експлуатації залізобетонні конструкції піддаються комплексній дії агресивних факторів, які у значній мірі підсилюються в умовах високих температур та вогню. Головним фактором, який впливає на залізобетонні конструкції при дії вказаних факторів є втрата міцнісних характеристик і як результат – руйнування.

Підвищити вогнестійкість залізобетонних конструкцій можливо шляхом їх поверхневої модифікації захисними матеріалами різної хімічної природи.

Розроблені на даний час склади покриттів не забезпечують необхідного захисту таких будівельних конструкцій в експериментальних умовах пожежі [3, 4]. Тому, підвищити вогнестійкість залізобетонних конструкцій можливо шляхом нанесення на їх поверхню наповнених вогнетривкими компонентами полісилоксанів, які володіють високими термостабільними властивостями в широкому інтервалі температур. В умовах дії високих температур при пожежі на вогнестійкість захищених залізобетонних конструкцій впливає фазовий склад покриття за рахунок значної різниці термомеханічних властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поліфункціональні захисні покриття на основі наповнених полісилоксанових композицій технологічні та можуть використовуватися для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкційних матеріалів внаслідок високих термомеханічних властивостей, які визначаються стабільним структурним та фазовим складом [2, 3]. Але, внаслідок гетерофазової будови та дії високих температур пожежі значний вплив на формування захисного теплоізоляційного шару мають процеси на межі контакту «покриття – бетон» [3, 5].

Разом з тим, вирішення питання впливу способу нанесення захисного покриття на поверхню залізобетону, його товщини, температури пожежі та складу вихідної композиції на вогнестійкість обробленого матеріалу залишається актуальним.

Формулювання цілі статті

Метою дослідження було дослідження впливу захисного покриття на основі наповненого оксидними компонентами полісилоксану на температуро- та вогнестійкість залізобетонних конструкцій.

Базовий склад вихідних композицій для вогнезахисних покриттів (табл. 1) обрано за допомогою методу математичного планування експерименту.

Таблиця 1

Склади вихідних композицій для захисних покриттів

№ складу покриття	Вміст компонентів, мас. %					
	КО-08	AL_2O_3	ZrO_2	Каолін	Каолінове волокно	Шамотний бій
1	20	40	35	-	5,0	-
2	40	20	38	-	2,0	-
3	25	40	10	20	5,0	-
4	35	35	18	10	2,0	-
5	30	30	22	12,5	3,5	2,0
6	35	25	25	10	2,0	3,0

Агрегативностійкі композиції із рівновисокою однорідністю отримано шляхом сумісного механо-хімічного диспергування компонентів у кульових млинах за рахунок процесів руйнування кристалічної гратки оксидного наповнювача та добавки, фізичної адсорбції та прививання фрагментів полісилоксанового плівкоутворювача до поверхні наповнювача. Методом ІЧ-спектроскопії визначено оптимальний термін диспергування (100–125 год) та масу привитого полімеру (5,7–6,3 мас. %).

Проведені та опубліковані експериментальні дослідження показали, що текучість вихідної композиції залежить тільки від вмісту плівкоутворювача (20–26 сек.) а сухий залишок складає 75–85 мас.%. Міцність на згин розроблених складів покриттів 1–2 мм та залежить тільки від вмісту наповнювача. Міцність на удар є лише функцією складу вихідної композиції та змінюється в межах 4,0–5,0 Дж [6].

Експлуатаційні властивості захисних покриттів (адгезійна міцність, суцільність, вогнестійкість, тощо) значною мірою залежать від технологічного режиму їх нанесення на поверхню бетону та умов затвердівання. Попередніми дослідженнями [3, 5, 6] встановлено, що після нанесення вихідної композиції для захисного покриття на поверхню бетону проходить випаровування органічного розчинника з повною полімеризацією полісиликсанового плівкоутворювача з утворенням міцного захисного шару. При цьому полісилоксан виконує роль матриці, дисперсійною фазою є частинки алюмінію, цирконію оксидів, шамотний бій, каолін та каолінове волокна. Залежно від складу вихідної композиції, мікротвердість утвореного захисного покриття на поверхні бетоні, що є критерієм ступеня затвердівання, змінюється у широких межах.

Вивчено вплив умов затвердівання захисного покриття на його мікротвердість за режимами:

- витримане 2 години при температурі 353 К;
- витримане 1 година при температурі 423 К;
- витримане 0,1 години при температурі 473 К;
- витримане 24 години при температурі 293 К.

Результати досліджень наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Зміна мікротвердості захисних покриттів в залежності від режиму затвердівання

№ складу покриття	Мікротвердість в залежності від режиму затвердівання, МПа,			
	1	2	3	4
1	264,5	289,3	271,7	243,2
2	263,4	278,9	269,8	231,7
3	247,3	271,3	260,4	225,3
4	252,7	275,7	263,2	233,5
5	250,4	270,2	259,3	229,1
6	262,5	282,3	265,9	242,3

Експериментально встановлено, що найвищі показники мікротвердості (271,3–289,3 МПа) захисного покриття отримано за 2 режимом затвердіння. При цьому воно корелюється з вмістом наповнювача та залежить від масової частки каоліну. Мінімальні показники мікротвердості (225,3–243,2 МПа) характерні для захисних покриттів, які затвердівали за 4 режимом. Із врахуванням технологічних умов затвердівання та енергоощадливості, задовільних показників мікротвердості, для отримання захисних покриттів доцільно використати достатньо простий режим, а саме – 24 години при кімнатній температурі (293 К).

Нанесення вихідних композицій для захисних покриттів проводили за допомогою пульверизатора на попередньо очищену від пилу та висушену до вологості не вище 3 мас.% поверхню бетону. Товщина захисного покриття складала 0,4–0,6 мм.

Методами фізико-хімічного аналізу встановлено, що у процесі нагрівання за рахунок термоокисної деструкції полісилоксанового плівкоутворювача утворюються газоподібні продукти, що призводять до спучування покриття з утворенням теплоізоляційного захисного шару, характер якого залежить від товщини вихідного покриття, температури та градієнта нагрівання.

Встановлена залежність коефіцієнта спучення захисного покриття від товщини, швидкості та температури нагрівання (табл. 3), що вказує на його показники у широких межах.

Таблиця 3

Залежність коефіцієнта спучення покриття від товщини та швидкості температури нагрівання

№ складу покриття	Товщина покриття, мкм	Коефіцієнт спучення (Ксп) при температурі нагрівання (К)											
		573			673			773			873		
		Швидкість зростання температури (град/хв.)											
		20	60	120	20	60	120	20	60	120	20	60	120
2	400	1,14	1,82	3,12	2,87	5,14	6,21	3,02	7,12	8,14	3,07	8,12	10,41
	600	1,57	2,03	3,81	3,02	6,02	7,01	3,51	8,03	9,12	3,82	9,14	11,07
	800	1,92	2,87	4,03	3,41	7,93	8,14	3,91	9,02	10,14	4,03	10,10	11,97
5	400	1,16	1,91	3,08	2,91	5,27	6,31	3,09	7,51	8,27	3,12	8,47	10,37
	600	1,61	2,09	3,78	2,98	5,19	6,37	3,62	8,12	9,21	3,91	9,07	10,93
	800	2,01	2,17	4,18	3,31	7,12	8,21	4,01	8,93	10,02	3,98	10,12	11,37
6	400	1,21	2,01	3,17	3,01	5,21	6,37	3,87	7,14	8,93	3,93	8,53	10,87
	600	1,57	2,12	4,01	3,17	5,91	7,17	3,91	7,97	9,91	4,17	9,85	11,43
	800	2,07	2,37	4,33	3,53	6,95	8,29	4,02	8,91	10,14	4,83	10,19	11,87

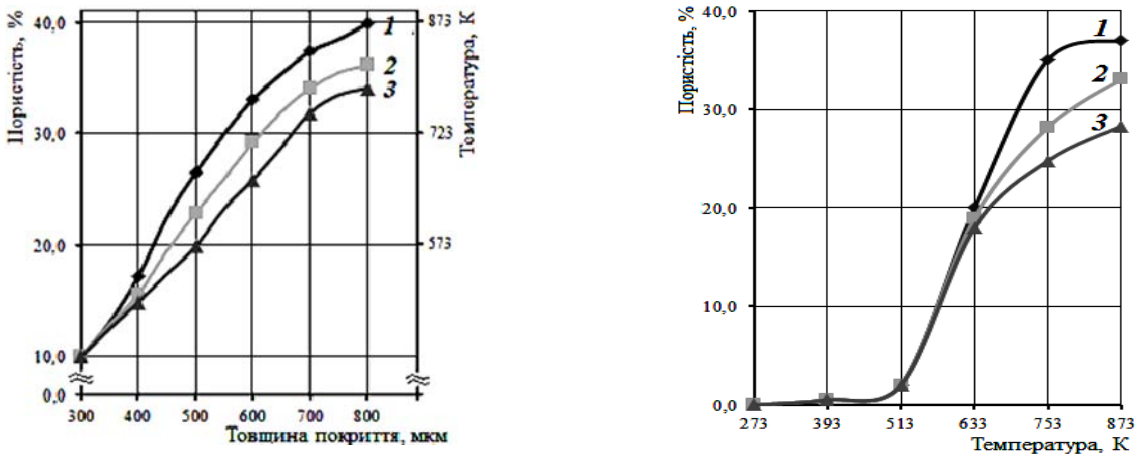
Так, при нагріванні до температури 573 К коефіцієнт спучення залежить від товщини і швидкості нагрівання. Збільшення товщини покриття приводить до зростання коефіцієнта спучення у 3–3,3 разу, а підвищення показника швидкості нагрівання – у 1,35–1,9 разів, що залежить від товщини покриття.

Слід відзначити, що збільшення товщини покриття менш суттєво впливає на коефіцієнт спучення. Підвищення температури нагрівання до 873 К веде до значного зростання коефіцієнта спучення, особливо при нагріванні із швидкістю 120 град/хв., а підвищення температури нагрівання до 873 К частково збільшує коефіцієнт спучення для покриттів із різним значенням товщини.

Максимальне значення коефіцієнта спучення (11,97 та 11,87) характерне для покриттів складів № 1 та № 5 при їх товщині 800 мкм та швидкості нагрівання 120 град/хв. Нагрівання захисних покриттів вище від температури 873 К призводить до незначного зменшення коефіцієнта спучення внаслідок спікання покриттів та утворення більш щільної структури.

Вивчено вплив товщини захисного покриття на показник загальної пористості у період термоокисної деструкції полісилоксанового плівкоутворювача (в інтервалі температур 573–873 К). Встановлено (рис. 1 а), що збільшення показника загальної пористості на 6 – 16 % проходить при нагріванні до температури 573 К при товщині захисного покриття 400–600 мкм.

Для захисного покриття товщиною 600 мкм визначена залежність показника загальної пористості від температури нагрівання (рис. 1 б).



а б

Рис. 1. Залежність показника загальної пористості захисного покриття від товщини (а) та від температури нагрівання (б): 1 – склад № 2; 2 – склад № 5; 3 – склад № 6

При нагріванні покриття до температури 513 К показник загальної пористості складає 2 % за рахунок випаровування залишків розчинника. Зростання кривих залежності показника пористості при нагріванні вище від температури 623 К проходить за рахунок процесів термоокисної деструкції полісилоксану. Максимальне значення загальної пористості знаходиться при нагріванні до температури 753 К (максимум процесу деструкції). Слід відзначити, що мінімальне значення загальної пористості (28,3) має покриття складу № 6.

Підвищення температури нагрівання вище від 753 К веде до зменшення показника пористості внаслідок перебігу процесів взаємодії між компонентами із утворенням нових силікатних фаз, які

ущільнюють структуру матеріалу за рахунок спікання.

Ефективність вогнезахисту залізобетонних конструкцій визначили у вогневій печі згідно з СТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010 Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання.(Дата введення в дію: 01.10.2011) (табл. 4).

Таблиця 4

Межа вогнестійкості залізобетонних зразків за втратою теплоізоляційної здатності

	№ складу покриття						
	1	2	3	4	5	6	Без покриття
Межа вогнестійкості, хв.	108	115	126	122	120	112	60

Отримані результати підтверджують доцільність використання розроблених складів захисних покриттів на основі наповненого оксидними та силікатними компонентами полісилоксану для підвищення у 1,8–2,1 рази межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій за втратою теплоізоляційної здатності.

Висновок

Експериментально встановлено оптимальний режим затвердіння захисного покриття, на поверхні бетону, яке досягається при нагріванні до температури 473 К або при витримуванні при кімнатній температурі протягом 24 год. Пористість захисного шару залежить від температури нагрівання, товщини покриття та швидкості підняття температури. Доведено, що при збільшені товщини покриття від 300 до 800 мкм за рахунок його спучення показник пористості зростає у 5,0–7,5 рази, а при підвищенні градієнта температур від 20 до 60 град/хв – у 8,2–9,4 рази.

Доведено ефективність вогнезахисту залізобетонних конструкцій розробленими складами захисних покриттів. При їх використанні межа вогнестійкості залізобетонних конструкцій за теплоізоляційною здатністю зростає у 1,8–2,1 рази.

Література

1. ДБН В.1.1.7–2016. Державні будівельні норми України. Пожежна безпека об’єктів будівництва. – [На заміну ДБН В.1.1.7 2002, чинний з 1 червня 2017 р.] [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.mil.gov.ua/content/other/TO_tkanuna_watermark.pdf.

2. Литовченко С. В. Повышение стабильности многофазных силицидных покрытий на молибдене / С. В. Литовченко, Т. С. Маслова, В. Г. Кириченко и др. // Вісн. НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 52. – С. 94–98.

3. Лукин Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой / Е. С. Лукин // Огнеупоры и техническая керамика. – 1996. – № 4. – С. 2–13.

4. Aguilar-Santillan Joaguin. Mechanical activation of the decomhosition and sintering of kyanite / Joaguin Aguilar-Santillan, Ricardo Cuenca-Alvarez, Heberto Balmori-Ramires // J. Amer. Ceram. Soc. – 2002. – № 10. – P. 2425–2431.

5. Пащенко А. А. Полифункциональные элементоорганические покрытия / Пащенко А. А. – К. : Вища школа, 1987. – 198 с.

6. Демидчук Л. Б. Органосилікатні температуростійкі покриття для будівельних матеріалів / Л. Б. Демидчук, М. М. Гивлюд, І. В. Маргаль // Вісник Хмельницького Національного університету / науковий журнал, технічні науки . – Хмельницький, 2012. – № 1. – С. 92–96.

References

1. DBN V.1.1.7–2016. Derzhavni budivel'ni normy Ukrayiny. Pozhezhna bezpeka ob'yektiv budivnytstva. – Na zminu DBN V.1.1.7 2002, chynnyy z 1 chervnya 2017 r. URL: http://www.mil.gov.ua/content/other/TO_tkanuna_watermark.pdf.

2. Lytovchenko S. V. Povy`shenye stabyl'nosty mnohofazny`kh sylytsydny`kh pokry`tyy na molybdene / S. V. Lytovchenko, T. S. Maslova, V. H. Kyrychenko y dr. // Visn. NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2005. – No 52. – pp. 94-98.

3. Lukyn E. S. Sovremennaya vysokoplotnaya oksydnaya keramyka s rehulyruemoy mykrostrukturoy / E. S. Lukyn // Ohneupory y tekhnycheskaya keramyka. – 1996. – # 4. – S. 2-13.

4. Aguilar-Santillan Joaguin. Mechanical activation of the decomhosition and sintering of kyanite / Joaguin Aguilar-Santillan, Ricardo Cuenca-Alvarez, Heberto Balmori-Ramires // J. Amer. Ceram. Soc. – 2002. – No 10. – pp. 2425-2431.

5. Pashchenko A. A. Polyfunktsyonal'nыe elementoorhanycheskye pokrytyya. – K.: Vyshcha shkola, 1987. – 198 s.

6. Demydchuk L. B. Orhanosylikatni temperaturostiyki pokryttya dlya budivel'nykh materialiv / L. B. Demydchuk, M. M. Hyvlyud, I. V. Marhal' // Herald of Khmelnytsky National University / naukovyy zhurnal, tekhnichni nauky . – Khmel'nyts'kyy, 2012. – No. 1 – pp. 92 – 96.

Рецензія/Peer review : 19.08.17 р. Надрукована/Printed :20.08.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Пелик Л.В.

УДК 21.785.53

В.А. ГОНЧАР
Хмельницький національний університет

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В СТАЛІ 20 ТА ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ НА ЇХ ВЕЛИЧИНУ

Проведено аналіз впливу залишкових напружень на міцність і експлуатаційні характеристики конструкційних при наявності покриттів. Наведені результати експериментальних досліджень залишкових напружень в дифузійних шарах після іонного азотування сталі 20 в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. На основі планування експериментів одержані аналітичні і графічні залежності величини залишкових напружень від зміни технологічних параметрів процесу іонного азотування, встановлена залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару від його твердості. Зроблені висновки.

Ключові слова: іонне азотування, залишкові напруження,технологічні параметри, твердість.

V.A. GONCHAR
Khmelnytsky National University

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ION NITRIDING ON THE VALUE OF RESIDUAL STRESSES IN 20 STEEL

The analysis of influence of residual stresses on the strength and performance of construction parts having been coated. The experimental results of residual stresses in the diffusion layers after ion nitriding of 20 steel in hydrogen-free environments in different technological modes. Based on the planning experiments we have arrived at the results on analytical and graphical dependence of residual stress of changing technological parameters of ion nitriding. We specified the relation of residual stresses on the surface of the nitrided layer to its hardness. Conclusions.

Keywords: ion nitriding, residual stresses, technological parameters, hardness.

Вступ

Одним із перспективних напрямів підвищення зносостійкості,надійності і довговічності конструкційних елементів є зміцнення поверхні з застосуванням функціональних покриттів. При нанесенні покриттів в поверхневих шарах виникають залишкові напруження, що впливають на напружено-деформований стан, міцність і експлуатаційні характеристики конструкційних елементів [1–6]. Залишкові напруження можуть досягати великих значень і мати різні знаки (стиску або розтягу) в залежності від технології та властивостей нанесених покриттів [1, 2, 5, 6]. Вплив залишкових напружень на експлуатаційні властивості конструкційних елементів може бути позитивним або негативним, відповідно підвищуючи або знижуючи їх значення, в залежності від величини та знаку [1–3, 5, 6]. Тому необхідність поглиблення уявлень про природу залишкових напружень в покриттях, а також визначення їх величини, характеру, розподілу по товщині та можливостей керування їх рівнем з метою покращення експлуатаційних характеристик конструкційних елементів в системі "основа-покриття" за рахунок удосконалення технології нанесення покриттів та створення відповідної конструкції поверхневого шару є очевидною.

Дослідженнями [1, 2, 4] показано, що в дифузійних покриттях виникають залишкові напруження стиску, які позитивно впливають на міцніть і довговічність конструкційних елементів в процесі розтягу, багатоцикловій втомі при згині та контактній витривалості в процесі циклічного навантаження. Залишкові напруження не рівномірно розподіляються по товщині покриття, а їх величина та характер розподілу залежать і керуються технологічними параметрами процесу дифузійного насичення.

Мета досліджень

Метою досліджень є визначення впливу технологічних параметрів процесу іонного азотування в безводневих середовищах сталі 20 на величину залишкових напружень, що виникають в азотованих шарах.

Методика досліджень

Для досягнення поставленої мети проводилися експериментальні дослідження величини залишкових напружень в тонких пластинках із сталі 20 розміром 200×15×1 мм після їх іонного азотування в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. Технологічні параметри процесу азотування змінювалися в широких межах (температура азотування T = 480–600 °С; тиск в вакуумній камері P = 80–400 Па; час дифузійного насичення τ = 20–240 хв; вміст аргону в суміші з азотом Ar = 0–76%). Азотування поверхні зразків проводилося з однієї сторони після чого вимірювалися: прогин f зразків з точністю до 0,01 мм з використанням спеціального пристрою; товщину азотованого шару методом металографії; твердість поверхні азотованого шару з допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Виходячи з величини виміряного прогину пластини, використовуючи рівняння пружної лінії для балки, середні значення залишкових напружень σ_c визначалися за залежністю [8]:

$$\sigma_c = \frac{32 E_o h_o^3 f}{3a^2 h_n (1-\nu_o)(2h_o + h_n)}, \quad (1)$$

де h_o, h_n – товщини основи і покриття;
E_o, ν_o – модуль пружності основи першого роду і коефіцієнт Пуассона матеріалу основи;
f – прогин зразка;
a – довжина зразка.

Величину залишкових напружень в любій точці по товщині азотованого шару знаходили за формулою [9]:

$$\sigma_n = \sigma_c \cdot e^{-\frac{k(z-0.45h_n)}{(h_n-z)^{0.94}}}, \quad (2)$$

де z – віддаль від поверхні до точки знаходження залишкових напружень в покритті;

h_n – товщина покриття;

k – коефіцієнт, що враховує вплив температури Т °К нанесення дифузійного покриття. Наприклад, при іонному азотуванні k = 900/ Т°К, який знаходиться з експерименту.

Для скорочення кількості експериментів при дослідженні впливу зазначених вище технологічних параметрів на фізико-механічні властивості та залишкові напруження в азотованому шарі було застосовано метод планування експериментів – 4-факторний план другого порядку Хартлі [7], відповідно до якого азотування проводилося за 20 режимами (табл. 1). При цьому математична залежність залишкових напружень від технологічних параметрів процесу азотування описується рівнянням регресії, яке має вид:

$$\varphi(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \\ + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4, \quad (3)$$

де $\varphi(x)$ – функція відклику (вихідна змінна);

β_0, β_i, β_{ii}, β_{ij} – коефіцієнти рівняння регресії;

x_i, x_j – незалежні змінні величини (фактори).

Результати досліджень

В таблиці 1 наведені результати експериментальних досліджень властивостей (товщини і твердості поверхні) азотованого шару та величини прогину зразків після іонного азотування в безводневих середовищах за різними технологічними режимами. За формулами (1) і (2) розраховані середні значення залишкових напружень σ_c в азотованих шарах та їх максимальне значення σ_n, що виникають на поверхні, залежно від режимів азотування.

Таблиця 1

Вплив технологічних режимів іонного азотування на товщину h_n і мікротвердість H_{100} азотованого шару та залишкові напруження на поверхні σ_n і середні σ_c, в сталі 20

№ режиму азотування	Значення факторів режиму азотування				h_n, мкм	H_{100}, МПа	Прогин f, мм	σ_c, МПа	σ_n, МПа
	T, °С	P, Па	τ, хв	об. % Ar					
1	570	320	185	57	182	4137	2.48	139	276
2	510	320	185	57	147	3839	2.00	120	244
3	570	160	185	19	203	4312	2.62	142	289
4	510	160	185	19	169	4184	2.18	138	279
5	570	320	75	19	167	4627	2.86	165	323
6	510	320	75	19	94	3399	1.60	103	207
7	570	160	75	57	162	5652	4.28	215	425
8	510	160	75	57	124	3944	3.52	220	254
9	480	240	130	38	145	3039	1.32	79	163
10	600	240	130	38	233	5219	4.20	196	382
11	540	80	130	38	217	5529	3.92	206	413
12	540	400	130	38	169	3809	2.08	120	241
13	540	240	20	38	64	4319	2.14	148	292
14	540	240	240	38	162	3689	1.98	115	229
15	540	240	130	0	145	3804	2.06	124	240
16	540	240	130	76	109	3684	1.76	113	226
17	540	240	130	38	156	4500	2.40	151	310
18	540	240	130	38	159	4550	2.44	157	315
19	540	240	130	38	157	4520	2.42	155	311
20	540	240	130	38	161	4560	2.46	158	316

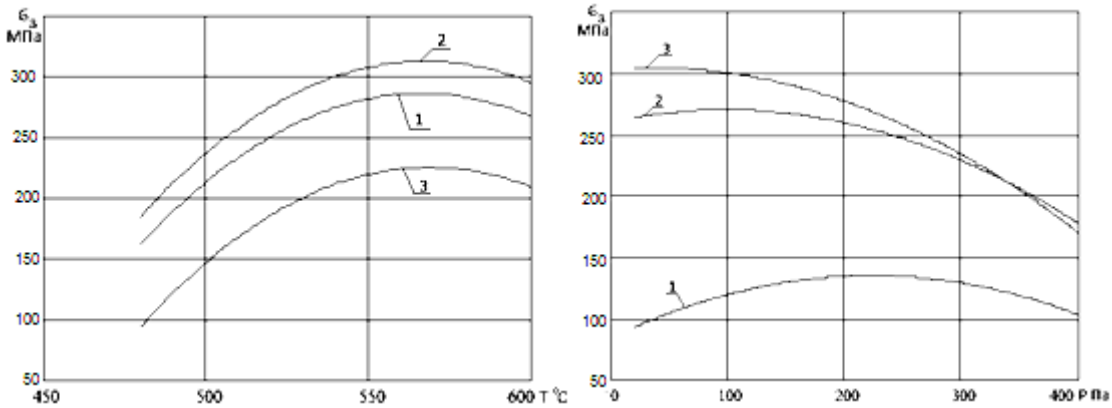
З таблиці 1 видно, що технологічні параметри процесу азотування мають великий вплив на властивості та залишкові напруження в азотованих шарах, які змінюються в широких межах. Зокрема середнє значення залишкових напружень σ_c знаходиться в межах 185–305 МПа, а максимальні залишкові напруження на поверхні σ_n – в межах 375–608 МПа при даних режимах азотування. При цьому вони залежать від твердості та товщини азотованого шару. На основі експериментальних даних одержана математична залежність σ_n від технологічних параметрів процесу азотування в вигляді рівняння регресії другого порядку:

$$\sigma_n\,(\text{МПа}) = 302 + 71\,x_1 - 63\,x_2 - 45\,x_3 - 22\,x_4 - 79\,x_1^2 - 38\,x_2^2 - \quad (4)$$

$$- 68\, x_3^2 - 88\, x_4^2 - 55\, x_1x_2 + 3\, x_1x_3 - 29\, x_1x_4 - 19\, x_2x_3 - 11\, x_2x_4 - 51\, x_3x_4,$$

де $x_1 = \frac{(T-540)}{60}$; $x_2 = \frac{(P-240)}{160}$; $x_3 = \frac{(\tau-130)}{110}$; $x_4 = \frac{(Ar-38)}{38}$.

На рис. 1 і 2 наведені графіки залежності σ_n від технологічних параметрів процесу іонного азотування, що побудовані на основі рівняння (4), з яких видно, що ці залежності мають екстремальний характер і існують певні значення кожного з технологічних параметрів (температури, тиску, часу дифузійного насичення і вмісту аргону в насичуючому середовищі), при яких залишкові напруження досягають екстремального значення. При цьому існує технологічний режим азотування, що забезпечує максимальне значення залишкових напружень. Для сталі 20 таким технологічним режимом є: T = 565 °C; P = 80 Па; τ = 120 хв; 65 об.%N_2 + 35 об.% Ar, що забезпечує σ_n = 718 МПа.

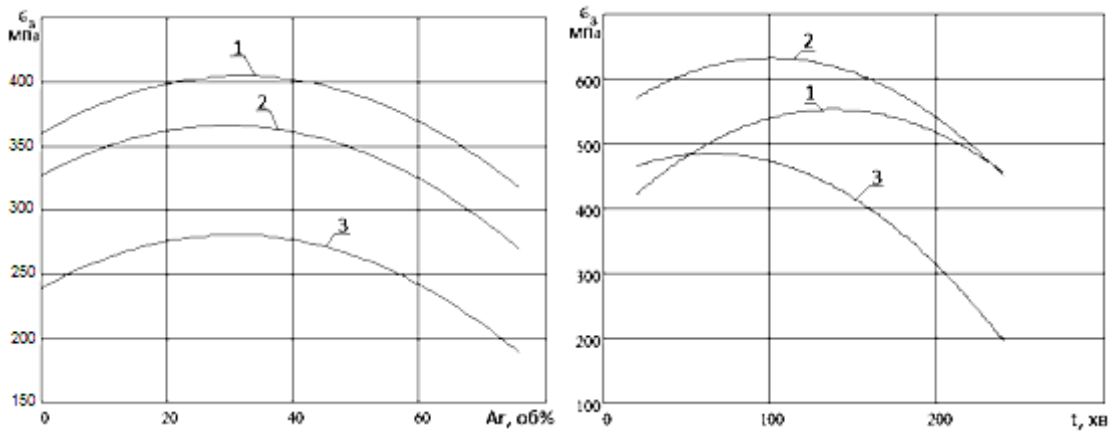


а б

Рис. 1. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 20 від температури іонного азотування і тиску в вакуумній камері:

а) $\sigma_з = f$(T) при P = 240 Па, суміші 62 об.% N_2 + 38 об. % Ar, часі насичення τ: 1 – 20 хв., 2 – 130 хв, 3 – 240 хв;

б) $\sigma_з = f$(P) при часі дифузійного насичення τ= 130 хв, в суміші 62 об.%N_2 + 38 об. % Ar та при різних температурах азотування: 1 – 480 C, 2 – 540 C, 3 – 570 °C



а б

Рис. 2. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 20 від вмісту аргону в насичуючому середовищі та часу дифузійного насичення при температурі 570 °C:

а) $\sigma_3 = f$(Ar об. %) при часі азотування τ = 130 хв і різних тисках P в вакуумній камері: 1 – 80 Па, 2 – 240 Па, 3 – 400 Па;

б) $\sigma_3 = f(\tau)$ при тиску P = 240 Па та в різних середовищах: 1 – 100 об. %N_2, 2 – 62 об. % N_2 + 38 Ar об. %, 3 – 25 об. % N_2 + 75 Ar об. %

На рис. 3 наведена залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару сталі 20 від твердості цієї поверхні при різних режимах іонного азотування в безводневих середовищах. З рисунка видно, що існує кореляційна залежність між цими характеристиками, яку можна описати такою формулою:

$$H_n = H_o + k \cdot \sigma_n, \quad (5)$$

де H_n і H_o – твердість поверхні азотованого шару і твердість основи сталі; k – коефіцієнт пропорційності, який знаходиться з експерименту для кожної марки сталі після азотування. Коефіцієнт k = ctgα = $(H_n - H_o)/\sigma_n$ і для сталі 20 дорівнює 8.1.

Висновки

Технологічні параметри процесу іонного азотування мають великий вплив на залишкові напруження стиску, що виникають в азотованих шарах і їх величину можна змінювати в широких межах за

рахунок зміни температури, тиску, складу насичуючого середовища та часу дифузійного насичення.

Залежність залишкових напружень в азотованих шарах від технологічних параметрів процес у азотування має екстремальний характер з вираженим максимумом, що дозволяє оптимізувати процес зміцнення з метою одержання оптимальних значень залишкових напружень для забезпечення максимальних експлуатаційних характеристик конструкційних елементів.

Залишкові напруження на поверхні азотованих шарів мають кореляційний зв'язок з твердістю поверхні азотованого шару.

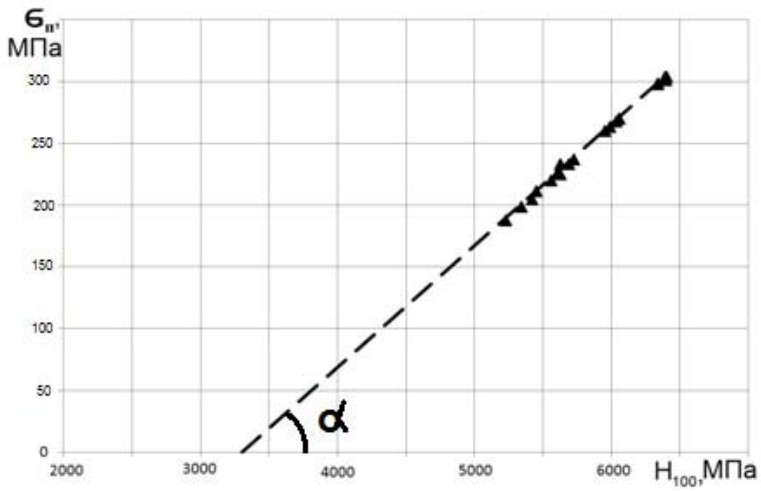


Рис. 3. Залежність залишкових напружень на поверхні азотованого шару σ_n від твердості H_{100} азотованої поверхні

Література

1. Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных середах / В.Г. Каплун П.В. Каплун // Хмельницький : ХНУ, 2015. – 344 с.
2. Карпенко Г.В. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий / Г.В. Карпенко, В.И. Похмурский, В.Б. Далисов, В.С. Замиховский. – Киев : Наук. думка, 1971. – 167 с.
3. Барвинок В.А. Теоретические и экспериментальные исследования формирования напряженного состояния плазменных покрытий / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, А.Г. Цидулко // Температуроустойчивые покрытия. – Л. : Наука, 1985. – С. 141–145.
4. Похмурский В.И. Характер распределения остаточных напряжений первого рода в поверхностных слоях сталей и сплавов с защитными покрытиями / В.И. Похмурский, Г.В. Карпенко // Физико-химическая механика метал лов. – 1968. – Т. 4. – № 4. – С. 381–383.
5. Трапезон А.Г. О влиянии вакуумных покрытий на сопротивление усталости технического титана / А.Г. Трапезон, Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский // Пробл. прочности. – 1995. – № 11–12. – С. 32–38.
6. Антонюк В.С. Залишкові напруження в вакуум-плазмових покриттях TiN, (TiAl)N, (TiC)N / В.С. Антонюк, О.Б. Сорока, А.В. Рутковський, В.І. Мірненко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2004. – № 7(77) (Частина 2). – С. 206–210.
7. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск : Изд. БГУ, 1982. – 302 с.
8. Патент UA №28383: GO 1L1/06. Спосіб визначення структурних і температурних складових залишкових напружень в покриттях / Антонюк В.С., Сорока О.Б., Клименко С.А., Копейкіна М.Ю. – № u200707507 ; заявл. 04.07.2007 ; опубл. 10.12.2007.
9. Каплун П.В. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування / П.В. Каплун, В.А. Гончар, Т.В. Донченко, В.О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету, серія : Технічні науки. – 2015. – № 6. – С. 7–12.

References

1. Kaplun V.H. Yonnoe azotyrovanye v bezvodorodnykh seredakh / V.H. Kaplun P.V. Kaplun // Khmelnytskyi : KhNU, 2015. – 344 s.
2. Karpenko H.V. Vlyianye dyffuzyonnykh pokrytyi na prochnost stalnykh yzdelyi / H.V. Karpenko, V.Y. Pokhmurskyi, V.B. Dalysov, B.C. Zamykhovskyi. – Kyev : Nauk. dumka, 1971. – 167 s.
3. Barvynok V.A. Teoretycheskye y eksperymentalnye yssledovanyia formyrovanyia napriazhennoho sostoianyia plazmennykh pokrytyi / V.A. Barvynok, V.Y. Bohdanovych, A.H. Tsydulko // Temperaturoustoichyvye pokrytyia. – L. : Nauka, 1985. – S. 141–145.
4. Pokhmurskyi V.Y. Kharakter raspredelenyia ostatochnykh napriazhenyi pervoho roda v poverkhnostnykh sloiakh stalei y splavov s zashchytnymy pokrytyiamy / V.Y. Pokhmurskyi, H.V. Karpenko // Fyzyko-khymycheskaia mekhanyka metal lov. – 1968. – T. 4. – # 4. – S. 381–383.
5. Trapezon A.H. O vlyianyy vakuumnykh pokrytyi na soprotyvlenye ustalosty tekhnycheskoho tytana / A.H. Trapezon, B.A. Liashenko, A.V. Rutkovskyi // Probl. prochnosty. – 1995. – # 11–12. – S. 32–38.
6. Antoniuk V.S. Zalyshkovi napruzhennia v vakuum-plazmovykh pokryttiakh TiN, (TiAl)N, (TiC)N / V.S. Antoniuk, O.B. Soroka, A.V. Rutkovskyi, V.I. Mirnenko // Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. Volodymyra Dalia. – Luhansk, 2004. – # 7(77) (Chastyna 2). – S. 206–210.
7. Krasovskyi H.Y. Planyrovanye eksperymenta / H.Y. Krasovskyi, H.F. Fylaretov. – Mynsk : Yzd. BHU, 1982. – 302 s.
8. Patent UA #28383: GO 1L1/06. Sposib vyznachennia strukturnykh i temperaturnykh skladovykh zalyshkovykh napruzhen v pokryttiakh / Antoniuk B.C., Soroka O.B., Klymenko S.A., Kopeikina M.Yu. – # u200707507 ; zaiavl. 04.07.2007 ; opubl. 10.12.2007.
9. Kaplun P.V. Vyznachennia zalyshkovykh napruzhen v azotovanykh sharakh pislia ionnoho azotuvannia / P.V. Kaplun, V.A. Honchar, T.V. Donchenko, V.O. Kurskaia // Herald of Khmelnytskyi National University, seriia : Tekhnichni nauky. – 2015. – # 6. – S. 7–12.

Рецензія/Peer review : 13.07.2017 р. Надрукована/Printed :05.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Каплун В.Г.

УДК 678.023.5

О.М. СИНЮК, Н.К. МЕДВЕДЧУК
Хмельницький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС ВПЛИВУ НА НЬОГО НАПРУЖЕНЬ ЗСУВУ

Отримано залежності, які дозволяють для заданого полімерного матеріалу визначати мінімальну деформацію зсуву в повздовжньому та поперечному до попередньої орієнтації витягнутих сферолітів напрямків, яку необхідно створити перероблюючим обладнанням для остаточного руйнування зв'язків між сферолітами або їх конгломератами, тобто для остаточного подрібнення полімерів.

Отримані аналітичні вирази дозволяють перейти до проектування технологічного устаткування і визначення конструктивно-технологічних параметрів пристроїв і процесів переробки полімерних матеріалів з урахуванням їх структури.

Ключові слова: *переробка, полімер, структура, напруження, деформація, зсув.*

O.M. SYNYUK, N. K. MEDVEDCHUK
Khmelnytskyi National University

DETERMINATION OF ELASTIC PROPERTIES OF POLYMERIC MATERIAL DURING THE INFLUENCE OF THE SHEAR STRESS

The dependences that allow to determine the minimum shear deformation for a given polymeric material in the longitudinal direction transverse to the previous orientation of the elongated direction of the spherulites are obtained. Thw deformation is necessary to be created in the recycling equipment for the final destruction of the bonds between the spherulites and their conglomerates, and the tots for the final grinding of the polymers.

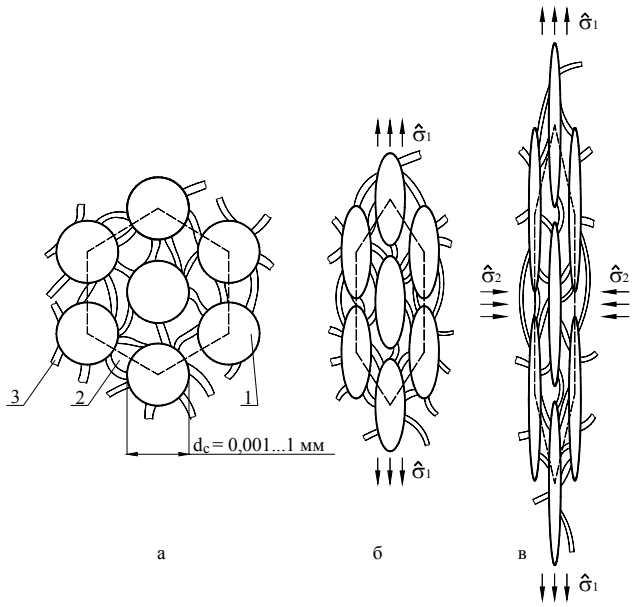
The obtained analytical expressions allow to proceed to the design of technological equipment and to determine the structural and technological parameters of devices and processes for the recycling of polymeric materials, taking into account their structure.

Keywords: *recycling, polymer, structure, stress, deformation, shear.*

ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ І АКТУАЛЬНІСТЬ

В рамках запропонованої в [1, 2] концепції сферолітної будови полімерних матеріалів розглянемо процес руйнування зв'язків між попередньо орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів при дії на полімер напружень зсуву в повздовжньому та поперечному до попередньої орієнтації напрямках.

В роботах [3, 4] розглядається процес витягнення і орієнтації сферолітів під дією напружень розтягу в повздовжньому напрямку [3, 4] та часткового руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів під дією напружень стиску [5] в поперечному до попередньої орієнтації напрямку (рис. 1).



1 – сфероліт; 2 – аморфний простір; 3 – прохідні фібрили

Рис. 1. Модель сферолітної структури полімеру в неорієнтованому (а), орієнтованому (б, в) стані

Напруження розтягу та стиску можна створити в полімерному матеріалі, пропускаючи його між зубчастими валками [5]. Для остаточного руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами сферолітів необхідно після пропускання полімерного матеріалу між зубчастими валками піддати його такому впливу, що призведе до виникнення в матеріалі напружень зсуву в повздовжньому та поперечному до орієнтації витягнутих сферолітів напрямках.

Здійснення процесу переробки полімерних відходів в два етапи дозволяє суттєво скоротити енергоємність даного процесу і зберігати у переробленому полімері механічні властивості, що близькі до оригінального.

Переробка полімерних відходів здійснюється шляхом руйнування зв'язків між орієнтованими конгломератами витягнутих сферолітів, що забезпечується за рахунок зменшення напружень однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами. Для інтенсифікації процесу руйнування вказаних зв'язків полімерний матеріал після дії на нього напружень розтягу і стиску піддається впливу напружень зсуву.

Вплив напружень зсуву на орієнтовані конгломерати сферолітів приводить не тільки до їх відносного зсуву, але й до їх повороту, що сприяє руйнуванню тих зв'язків між конгломератами сферолітів, що не були зруйновані їх взаємним зсувом.

В результаті впливу на полімерний матеріал напруженнями розтягу, стиску та зсуву сферолітна

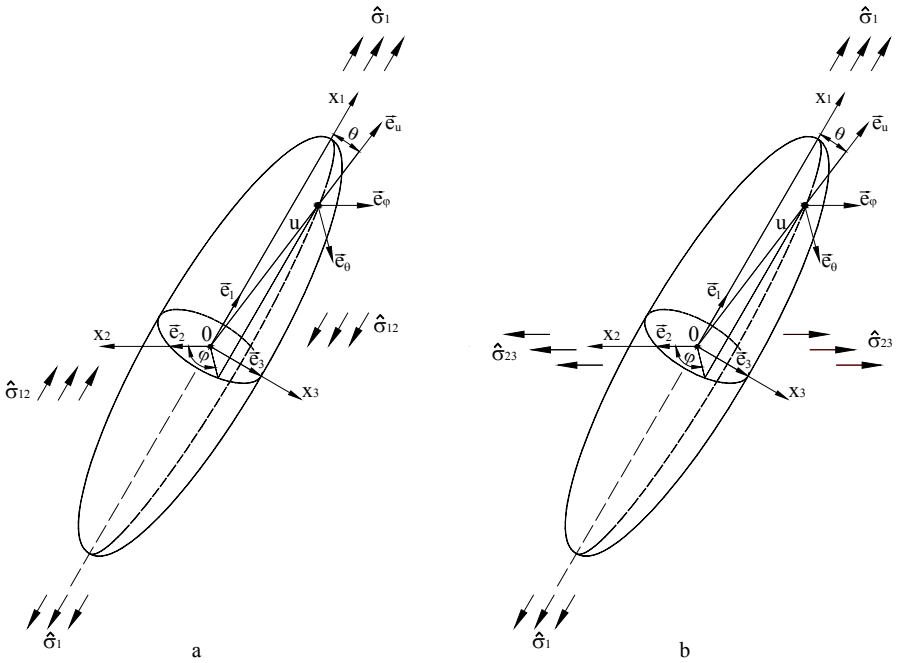
структура полімеру руйнується. При цьому полімерний матеріал структурується, тобто складається з майже не зв'язаних між собою конгломератів витягнутих сферолітів. Далі полімерний матеріал зі структурованою будовою потрапляє під вплив пристрою, що остаточно його руйнує, відокремлюючи згадані конгломерати один від другого. У зв'язку з тим, що міцність структурованого полімеру набагато менша від міцності самих сферолітів, то процес руйнування полімерних відходів відбувається з набагато меншими енерговитратами.

Таким чином, задачею даного дослідження є отримання аналітичних залежностей, що дозволять визначати ефективні пружні властивості полімерного матеріалу при повздовжньому та поперечному зсуві. За допомогою отриманих залежностей, знаючи властивості певного полімеру можна визначати мінімальну деформацію зсуву, яку необхідно створити перероблюючим обладнанням для остаточного руйнування зв'язків між конгломератами витягнутих сферолітів, тобто для остаточного подрібнення полімерів.

ВИКЛАДЕННЯ МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективні пружні властивості полімерного матеріалу при повздовжньому зсуві

Розгляд пружних властивостей полімерних матеріалів з орієнтованою структурою витягнутих сферолітів у випадку поперечного зсуву під дією напруження σ_{23} дозволяє визначити модуль зсуву G_{23} (рис. 2 а).



a – повздовжній зсув в площині первинного розтягу;
b – поперечний зсув в площині, перпендикулярній до первинного розтягу

Рис. 2. Вплив напружень зсуву на попередньо витягнутий сфероліт

Для визначення пружних властивостей (модуля пружності) в поперечній до напрямку витягування площині розглянемо випадок поперечного зсуву під дією напруження σ_{23} попередньо орієнтованої сферолітної будови полімерного матеріалу.

Під час поперечного зсуву в сфероліті виникає напружений стан, що згідно з діадним представленням [1, 6, 7] можна записати в такому вигляді:

$$\mathbf{T} = \vec{e}_1\vec{e}_1\sigma_1 + \vec{e}_2\vec{e}_2\sigma_2 + \vec{e}_3\vec{e}_3\sigma_3 + \left(\vec{e}_1\vec{e}_2 + \vec{e}_2\vec{e}_1\right)\cdot\sigma_{12} + \left(\vec{e}_2\vec{e}_3 + \vec{e}_3\vec{e}_2\right)\cdot\sigma_{23} + \left(\vec{e}_3\vec{e}_1 + \vec{e}_1\vec{e}_3\right)\cdot\sigma_{31}, \quad (1)$$

де $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ – одиничні орти декартової системи координат; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – нормальні напруження, що діють на площадках, перпендикулярних до відповідних осей системи координат; $\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$ – тангенціальні (дотичні) напруження, що діють на тих же площадках.

Зорієнтуємо осі координат таким чином, щоб на площадках елементарного об'єму, обмеженого еліпсоїдальною поверхнею, нормальні напруження були відсутні. Представимо кожне головне напруження як добуток середнього напруження $\hat{\sigma}_{23}$, що діє на сфероліт в площині $x_2 0 x_3$, та невідомих постійних α_{23}^0, що характеризують рівень напружень однорідної взаємодії і рівень напружень на головних площадках. Тоді рівняння (1) перепишеться таким чином:

$$\mathbf{T}_c = \left(\vec{e}_2\vec{e}_3 + \vec{e}_3\vec{e}_2\right)\cdot\alpha_{23}^o\cdot\hat{\sigma}_{23}, \quad (2)$$

де $\hat{\sigma}_{23}$ – середнє напруження поперечного зсуву, що діє на витягнутий сфероліт в площині $x_2 0 x_3$; α_{23}^0 – напруження однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами, що виникають в результаті зміни напружено-деформованого стану сферолітів.

В сферичних координатах r, θ, ϕ тензор напружень (2) можна виразити таким чином [1]:

$$\mathbf{T}_c = \left(\vec{e}_u\vec{e}_u\alpha_u^{\mathrm{c}} + \vec{e}_\theta\vec{e}_\theta\alpha_\theta^{\mathrm{c}} + \vec{e}_\phi\vec{e}_\phi\alpha_\phi^{\mathrm{c}} + \left(\vec{e}_u\vec{e}_\phi + \vec{e}_\phi\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{r\phi}^{\mathrm{c}} + \left(\vec{e}_\theta\vec{e}_\phi + \vec{e}_\phi\vec{e}_\theta\right)\cdot\alpha_{\theta\phi}^{\mathrm{c}} + \left(\vec{e}_u\vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{u\theta}^{\mathrm{c}}\right)\hat{\sigma}_{23}, \quad (3)$$

де α_i^{c} – невідома постійна, яка визначається з крайових умов, в якості яких використовуються умови ідеальності адгезійної взаємодії витягнутого сфероліта і аморфної фази (міжсферолітного простору), що дозволяє говорити про безперервність полів напружень та переміщень. Крайові умови розглядаються нижче.

Вектор полів переміщень для витягнутих сферолітів згідно до [1, 3] можна представити в такий спосіб:

$$\mathbf{u}_c = \left(\frac{1+\nu_c}{E_c}\alpha_{23}^c + K\right)x_3\vec{e}_2\hat{\sigma}_{23} + \left(\frac{1+\nu_c}{E_c}\alpha_{23}^c - K\right)x_2\vec{e}_3\hat{\sigma}_{23}, \quad (4)$$

де E_c – модуль пружності сфероліту; ν_c – коефіцієнт Пуассона сфероліту; K – постійна, що характеризує обертання витягнутого сфероліта навколо осі $0x_1$ як твердого тіла; α_{23}^c – невідома постійна.

Невідомі постійні K та α_{23}^c визначаються із розв'язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам:

$$u_u^{\mathrm{c}} = u_u^{\mathrm{a}}, \quad u_\theta^{\mathrm{c}} = u_\theta^{\mathrm{a}}, \quad \sigma_u^{\mathrm{c}} = \sigma_u^{\mathrm{a}}, \quad \sigma_{u\theta}^{\mathrm{c}} = \sigma_{u\theta}^{\mathrm{a}}. \quad (5)$$

Поле напружень у просторі між витягнутими сферолітами можна виразити через суму полів напружень:

– поля напружень взаємодії між витягнутими сферолітами, що утворюють структуру полімерного матеріалу у вигляді гексагонального пакування;

– соленоїдальне і вихрове поля, які розсіюються на сферолітах.

Поле однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами у випадку впливу на полімерний матеріал напружень поперечного зсуву, з урахуванням виразів, отриманих в роботах [1-4, 6] виразиться таким чином:

$$\mathbf{T}_a^o = \left(\vec{e}_u\vec{e}_u\alpha_u^{\mathrm{o}} + \vec{e}_\theta\vec{e}_\theta\alpha_\theta^{\mathrm{o}} + \vec{e}_\phi\vec{e}_\phi\alpha_\phi^{\mathrm{o}} + \left(\vec{e}_u\vec{e}_\phi + \vec{e}_\phi\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{u\phi}^{\mathrm{o}} + \left(\vec{e}_\theta\vec{e}_\phi + \vec{e}_\phi\vec{e}_\theta\right)\cdot\alpha_{\theta\phi}^{\mathrm{o}} + \left(\vec{e}_u\vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{u\theta}^{\mathrm{o}}\right)\hat{\sigma}_{23}, \quad (6)$$

Поле відносних переміщень витягнутих сферолітів або конгломератів витягнутих сферолітів у випадку однорідної взаємодії через аморфне середовище виразиться таким чином:

$$\mathbf{u}_a^o = \alpha_{23}^o\frac{1+\nu_a}{E_a}\left(x_3\vec{e}_2 + x_2\vec{e}_3\right)\hat{\sigma}_{23} \quad (7)$$

де E_a – модуль пружності аморфної фази (міжсферолітного простору); ν_a – коефіцієнт Пуассона аморфної фази.

Компоненти вектора відносних переміщень витягнутих сферолітів $\vec{u}^*$, у випадку першого розсіяного поля (соленоїдального), можна записати таким чином:

$$\begin{aligned} u_1^* &= \hat{\sigma}_{23}\frac{r\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}\left(1+\nu_a\right)}{E_a}\left(\frac{M}{3}+4N\right)\left(\cos\theta - 2\frac{1-\cos\theta}{\sin^2\theta}\right)\cdot Q_1^{(2)}(\mathrm{ch}\,u)\cos 2\phi; \\ u_2^* + i\,u_3^* &= \hat{\sigma}_{23}\frac{r\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}\left(1+\nu_a\right)}{E_a}\Big(M\cdot P_1^{(1)}(\cos\theta)\cdot Q_1^{(1)}(\mathrm{ch}\,u)\,e^{i\phi} + \\ &\quad + N\cdot Q_1^{(2)}(\mathrm{ch}\,u)\frac{1-8\cos\theta+6\cos^2\theta-\cos^4\theta}{\sin^2\theta}e^{3i\phi}\Big), \end{aligned} \quad (8)$$

де $P_1\left(\cos\theta\right)$ – поліноми Лежандра першого роду першого порядку; $Q_1^{(1)}(\mathrm{ch}\,u)$, $Q_1^{(2)}(\mathrm{ch}\,u)$ – приєднані функції Лежандра другого роду першого ступеня першого і другого порядку відповідно; r – радіус сфероліта до деформації; λ – ступінь попередньої витяжки полімерного матеріалу; M, N – невідомі постійні, що визначаються із розв'язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (5).

Компоненти вектора переміщення $\vec{u}^{**}$, у випадку другого розсіяного поля (вихрового) визначаються через функції Папковича-Нейбера у вигляді:

$$u_a^{**} = \hat{\sigma}_{23}\frac{\left(1+\nu_a\right)}{E_a}\left\{\left(3-4\nu_a\right)\vec{e}_1B_1 - x_1\cdot\mathrm{grad}\,B_1 - \mathrm{grad}\,B_0\right\}, \quad (9)$$

де

$$\begin{aligned} B_1 &= r\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}\left(2\frac{1-\cos\theta}{\sin^2\theta} - \cos\theta\right)P\cdot Q_1^{(1)}(\mathrm{ch}\,u)\cos 2\phi, \\ B_0 &= -\frac{r^2\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)}{4}P\cdot\mathrm{ch}^2\,u_0\cdot P_2^{(2)}(\cos\theta)Q_2^{(2)}(\mathrm{ch}\,u)\cos 2\phi, \end{aligned} \quad (10)$$

де P – невідома постійна, що визначається із розв'язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (5).

Невідомі постійні α_{23}^{c}, K, M, N, P виражаються через невідомі напруження однорідної взаємодії між витягнутими сферолітами α_{23}^{o}. Напруження однорідної взаємодії α_{23}^{o} будемо визначати з першого представлення пружної енергії при поперечному зсуві:

$$\hat{\sigma}_{23}\cdot\hat{\gamma}_{23}=\frac{1}{\theta}\int\limits_{(S_*)}\left(\sigma_u^a u_u^a+\sigma_{u\theta}^a u_\theta^a+\sigma_{u\phi}^a u_\phi^a\right)\cdot h\cdot h_\phi\cdot d\theta\, d\phi\,, \tag{11}$$

де S_* – приведена поверхня інтегрування, що прирівнюється до поверхні витягнутого сфероліта (до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, софокусного з сферолітом); u_u^a, u_θ^a, u_ϕ^a – функції зміщення, які виражаються з таких рівнянь:

$$\begin{aligned}
u_u^a&=\hat{\gamma}_{23}\frac{\operatorname{ch}u_*\cdot\operatorname{sh}u_*}{2\left(\operatorname{sh}^2u_*+\sin^2\theta\right)^{0,5}}\cdot r\cdot\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}\sin^2\theta\cdot\sin 2\phi,\\
u_\theta^a&=\hat{\gamma}_{23}\frac{r\cdot\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}}{2\left(\operatorname{sh}^2u_*+\sin^2\theta\right)^{0,5}}\cdot\operatorname{sh}^2u_*\cdot\cos\theta\cdot\sin\theta\cdot\sin 2\phi,\\
u_\phi^a&=\hat{\gamma}_{23}\frac{r\cdot\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}}{2}\cdot\operatorname{sh}u_*\cdot\sin\theta\cdot\cos 2\phi,
\end{aligned} \tag{12}$$

σ_u^a, $\sigma_{u\theta}^a$, $\sigma_{u\phi}^a$ – однорідні поля напружень, які можуть бути представлені такими виразами:

$$\begin{aligned}
\sigma_u^a&=-\frac{\hat{\sigma}_{23}}{\operatorname{sh}^2u_*+\sin^2\theta}\cdot\operatorname{ch}^2u_*\cdot\sin^2\theta\cdot\cos 2\phi,\\
\sigma_{u\theta}^a&=-\frac{\hat{\sigma}_{23}}{4\left(\operatorname{sh}^2u_*+\sin^2\theta\right)}\cdot\operatorname{sh}2u_*\cdot\sin 2\theta\cdot\cos 2\phi,\\
\sigma_{u\phi}^a&=\frac{\hat{\sigma}_{23}}{\operatorname{sh}^2u_*+\sin^2\theta}\cdot\operatorname{ch}u_*\cdot\sin\theta\cdot\sin 2\phi,
\end{aligned} \tag{13}$$

де u_* – зміщення на приведеній поверхні інтегрування S_*.

Ефективний модуль пружності (зсуву) при поперечному зсуві G_{23} будемо визначати з другого представлення пружної енергії:

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{\sigma}_{23}}{G_{23}}=\frac{1}{\theta}\int\limits_{(S_*)}\Bigg[&\frac{\operatorname{sh}^2u_*+\sin^2\theta}{\operatorname{sh}u_*\cdot\sin\theta}\left(-u_u^a\cdot\operatorname{ch}^2u_*\cdot\sin\theta-u_\theta^a\operatorname{ch}u_*\cdot\operatorname{sh}u_*\cdot\cos\theta\cdot\sin\theta\right)\cdot\cos 2\phi+\\
&+u_\phi^a\cdot\operatorname{sh}2u_*\cdot\cos\phi\cdot\sin\phi\Bigg]\,d\theta\cdot d\phi.
\end{aligned} \tag{14}$$

Інтегруючі вираз (11) і (14) з врахуванням рівнянь (7)–(10), а також (12) і (13), опускаючи громіздкі викладки перетворення, отримаємо вираз ефективного модуля пружності при поперечному зсуві:

$$G_{23}=E_a\frac{G1}{G2}\,, \tag{15}$$

де

$$\begin{aligned}
G1=&\left\{E_c\left(1+\nu_a\right)+2E_a\left(1-2\nu_c\right)+2\chi^2\left[E_c\left(1-2\nu_a\right)-E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\right\}\left\{E_c\left[\left(1+\nu_a\right)\beta_1^{**}+2\left(1-3\nu_a\right)\beta_3^{**}\right]-\right.\\
&\left.-4E_a\left(1-2\nu_c\right)\beta_4^{**}+\left(1+\nu_a\right)\left(7-5\nu_a\right)\left[E_c\left(1+\nu_a\right)\left(\gamma_2^{**}-\gamma_1^{**}\right)+E_a\left(1+\nu_c\right)\left(\gamma_4^{**}-\gamma_3^{**}\right)\right]\right\},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
G2=&4\left\{E_c\left(1+\nu_a\right)+2E_a\left(1-2\nu_c\right)+2\chi^2\left[E_c\left(1-2\nu_a\right)-E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\right\}\left\{E_c\left[\left(1+\nu_a\right)\beta_1^{**}+2\left(1-3\nu_a\right)\beta_3^{**}\right]-\right.\\
&\left.-4E_a\left(1-2\nu_c\right)\beta_4^{**}+\left(1+\nu_a\right)\left(7-5\nu_a\right)\left[E_c\left(1+\nu_a\right)\left(\gamma_2^{**}-\gamma_1^{**}\right)+E_a\left(1+\nu_c\right)\left(\gamma_4^{**}-\gamma_3^{**}\right)\right]\right\}-\\
&-\left\{E_c\left(1-2\nu_a\right)\left(1+\nu_a\right)+2E_a\left(1-2\nu_c\right)\left(1-2\nu_a\right)+\chi^2\left[E_a\left(1-2\nu_c\right)\left(1+\nu_a\right)-E_c\left(1-2\nu_a\right)\left(1+\nu_a\right)\right]\right\}\times\\
&\times\left\{E_c\left[\left(1+\nu_a\right)\beta_1^{**}+2\left(1-3\nu_a\right)\beta_3^{**}\right]+2E_a\left(1+\nu_c\right)\beta_4^{**}-\left(1+\nu_a\right)\left(7-5\nu_a\right)\left[E_c\left(1+\nu_a\right)\left(\gamma_2^{**}-\gamma_1^{**}\right)+\right.\right.\\
&\left.\left.+E_a\left(1+\nu_c\right)\left(\gamma_4^{**}-\gamma_3^{**}\right)\right]\right\},
\end{aligned}$$

де χ – ступінь об'ємної кристалічності полімерного матеріалу; γ_i^{**} і β_i^{**} – функції, що визначають зміну параметрів структури полімерного матеріалу від ступеня витяжки λ при поперечному зсуві.

$$\gamma_1^{**}=\frac{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\left(1+\lambda^3\right)\sqrt{\lambda^3-1}}{2\left(\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}\right)},\qquad \gamma_2^{**}=\frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3-1}-2\lambda\sqrt{\lambda}\ln a}{2\left(\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}\right)},$$

$$\gamma_3^{**}=\frac{3\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}\left(1+\lambda^3\right)}{2\left(\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}\right)},\qquad \gamma_4^{**}=\frac{3\lambda\sqrt{\lambda}\ln a-2\sqrt{\lambda^3-1}\left(2-\lambda^3\right)}{2\left(\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}\right)};$$

$$\begin{aligned}
\beta_1^{**}&=3-4\nu_a-\frac{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}\left(1+\lambda^3\right)}{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}}+\gamma_1^{**},\\
\beta_2^{**}&=3-4\nu_a-\frac{3\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}\left(2-\lambda^3\right)}{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}}+\gamma_2^{**},\\
\beta_3^{**}&=-(1-2\nu_a)\frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3-1}+2\lambda\sqrt{\lambda}\ln a}{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}}+\frac{3\lambda^3\ln a-2\lambda\sqrt{\lambda^3-1}\left(2-\lambda^3\right)}{\left(\lambda^3-1\right)\left[\ln a+2\lambda\sqrt{\lambda^3-1}\right]},\\
\beta_4^{**}&=\left(1-2\nu_a\right)\frac{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a-2\sqrt{\lambda^3-1}\left(1+\lambda^3\right)}{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a+2\sqrt{\lambda^3-1}}.
\end{aligned}\tag{16}$$

Вираз (15) з урахуванням виразів (16) дозволяє прогнозувати модуль пружності при поперечному зсуві G_{23} полімерного матеріалу з попередньо орієнтованою структурою залежно від ступеня витяжки λ та пружних властивостей матеріалу.

Ефективні пружні властивості полімерного матеріалу при повздовжньому зсуві

Прийнятий в роботі [8] трансверсально-ізотропний тип симетрії одноосноорієнтованого полімерного матеріалу передбачає наявність п'яти незалежних пружних постійних. Для обчислення повного комплекту пружних постійних попередньо орієнтованого полімерного матеріалу визначимо модуль пружності G_{12} при повздовжньому зсуві (рис. 2 b).

Тензор напружень сфероліта аналогічно до рівнянь (2) та (3) визначимо за такою формулою:

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_c&=\left(\vec{e}_1\vec{e}_2+\vec{e}_2\vec{e}_1\right)\cdot\alpha_{12}^o\cdot\hat{\sigma}_{12}=\left(\vec{e}_u\vec{e}_u\alpha_u^{\mathrm{c}}+\vec{e}_\theta\vec{e}_\theta\alpha_\theta^{\mathrm{c}}+\left(\vec{e}_u\vec{e}_\theta+\vec{e}_\theta\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{u\theta}^{\mathrm{c}}+\right.\\
&\left.+\left(\vec{e}_u\vec{e}_\phi+\vec{e}_\phi\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{u\phi}^{\mathrm{c}}+\left(\vec{e}_\theta\vec{e}_\phi+\vec{e}_\phi\vec{e}_\theta\right)\cdot\alpha_{\theta\phi}^{\mathrm{c}}\right)\hat{\sigma}_{12},
\end{aligned}\tag{17}$$

де α_u^{c}, $\alpha_\theta^{\mathrm{c}}$, $\alpha_{u\theta}^{\mathrm{c}}$, $\alpha_{u\phi}^{\mathrm{c}}$, $\alpha_{\theta\phi}^{\mathrm{c}}$ – невідомі постійні, що визначаються в такий спосіб:

$$\begin{aligned}
\alpha_u^{\mathrm{c}}&=\frac{\alpha_{12}^c}{2\left(\mathrm{sh}^2u+\sin^2\theta\right)}\mathrm{sh}\,2u\cdot\sin 2\theta\cdot\cos\phi,\\
\alpha_\theta^{\mathrm{c}}&=\frac{\alpha_{12}^c}{\mathrm{sh}^2u+\sin^2\theta}\mathrm{sh}\,2u\cdot\sin\theta\cdot\cos\theta\cdot\cos\phi,\\
\alpha_{u\theta}^{\mathrm{c}}&=\frac{\alpha_{12}^c}{\mathrm{sh}^2u+\sin^2\theta}\left(\mathrm{sh}^2u\cdot\cos^2\theta-\mathrm{ch}^2u\cdot\sin^2\theta\right)\cdot\cos\phi,\\
\alpha_{u\phi}^{\mathrm{c}}&=\frac{\alpha_{12}^c}{\left(\mathrm{sh}^2u+\sin^2\theta\right)^{0,5}}\mathrm{sh}\,u\cdot\cos 2\theta\cdot\sin\phi,\\
\alpha_{\theta\phi}^{\mathrm{c}}&=\frac{\alpha_{12}^c}{\left(\mathrm{sh}^2u+\sin^2\theta\right)^{0,5}}\mathrm{ch}\,u\cdot\sin\theta\cdot\sin\phi.
\end{aligned}\tag{18}$$

Поле переміщень сфероліта вздовж попередньої орієнтації полімерного матеріалу визначимо таким чином:

$$\mathbf{u}_c=\left(\alpha_{12}^c\frac{1+\nu_c}{E_c}-L\right)x_1\vec{e}_2\hat{\sigma}_{12}+\left(\alpha_{12}^c\frac{1+\nu_c}{E_c}+L\right)x_2\vec{e}_1\hat{\sigma}_{12},\tag{19}$$

де L – постійна, що визначає обертання витягнутого сфероліта як твердого тіла навколо осі $0x_3$ (рис. 2 b); α_{12}^c – невідома постійна.

Невідомі постійні L та α_{12}^c визначаються із розв'язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (5) і виражаються через напруження однорідної взаємодії α_{12}^o.

Поля напружень і переміщень в міжсферолітному просторі розкладемо на однорідні і розсіянні складові. Однорідні поля напружень $\mathbf{T}_a^o$ і переміщень $\mathbf{u}_a^o$ можна представити в такому вигляді:

$$\mathbf{T}_a^o = \left(\vec{e}_1\vec{e}_2 + \vec{e}_2\vec{e}_1\right)\cdot\alpha_{12}^o\cdot\hat{\sigma}_{12} = \left(\vec{e}_u\vec{e}_u\alpha_u^o + \vec{e}_\theta\vec{e}_\theta\alpha_\theta^o + \left(\vec{e}_u\vec{e}_\theta + \vec{e}_\theta\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{u\theta}^o + \\ + \left(\vec{e}_u\vec{e}_\phi + \vec{e}_\phi\vec{e}_u\right)\cdot\alpha_{u\phi}^o + \left(\vec{e}_\theta\vec{e}_\phi + \vec{e}_\phi\vec{e}_\theta\right)\cdot\alpha_{\theta\phi}^o\right)\hat{\sigma}_{12} \tag{20}$$

та

$$\mathbf{u}_a^o = \alpha_{12}^o\frac{1+\nu_a}{E_a}\left(x_1\vec{e}_2 + x_2\vec{e}_1\right)\hat{\sigma}_{12}\,. \tag{21}$$

Перше розсіяне (соленоїдальне) поле переміщень $\mathbf{u}^*$ відповідно до [1, 3, 6] визначається такими функціями:

$$u_1^a = -\hat{\sigma}_{12}\frac{1+\nu_a}{E_a}r\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}R\cdot Q_1^{(2)}(\operatorname{ch}u)\cdot P_1^{(2)}(\cos\theta)\cdot\cos\phi,$$
$$u_2^a == \hat{\sigma}_{12}\frac{1+\nu_a}{E_a}r\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}R\cdot Q_1^{(1)}(\operatorname{ch}u)\cdot P_1^{(1)}(\cos\theta), \tag{22}$$
$$u_3^a = 0,$$

де R – довільна постійна, що визначає рівень соленоїдального поля переміщень. Невідому постійну R будемо визначати із розв'язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (5) і виражаються через напруження однорідної взаємодії α_{12}^o.

Визначимо вектор напруження $\mathbf{W}_u^*$ на площадці з нормаллю $\vec{e}_u$ через переміщення (22), задовольняючі умові $\operatorname{div}\mathbf{u}^* = 0$:

$$\mathbf{W}_u^* = \frac{E_\text{a}}{1+\nu_\text{a}}\left(\frac{1}{H_u}\frac{\partial\mathbf{u}^*}{\partial u} + \frac{1}{2}\mathbf{e}_u\times\operatorname{rot}\mathbf{u}^*\right), \tag{23}$$

де $H_u = \sqrt{r^2\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)\left(\operatorname{sh}^2 u + \sin^2\theta\right)}$ – коефіцієнт Ламе.

Друге розсіяне (вихрове) поле переміщень визначається функціями Папковича-Нейбера у вигляді:

$$u_a^{**} = \hat{\sigma}_{12}\frac{\left(1+\nu_a\right)}{E_a}\left\{\left(3-4\nu_a\right)\vec{e}_1B_1 - x_1\cdot\operatorname{grad}B_1 - \operatorname{grad}B_0\right\}, \tag{24}$$

де

$$B_0 = -\frac{r^2\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)}{3}\cdot Z\cdot\operatorname{ch}^2 u\cdot Q_2^{(1)}(\operatorname{ch}u)\ P_2^{(1)}(\cos\theta)\cos\phi,$$
$$B_1 = r^2\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}\cdot Z\cdot Q_1^{(1)}(\operatorname{ch}u)\cdot P_1^{(1)}(\cos\theta)\cos\phi, \tag{25}$$
$$B_2 = B_3 = 0,$$

де Z – довільна постійна, що визначає рівень вихрового поля переміщень. Невідому постійну Z будемо визначати із розв'язку крайових рівнянь, які відповідають крайовим умовам (5) і виражаються через напруження однорідної взаємодії α_{12}^o.

Поле однорідної взаємодії α_{12}^o визначаємо з використанням першого представлення пружної енергії при повздовжньому зсуві:

$$\hat{\sigma}_{23}\cdot\hat{\gamma}_{12} = \frac{1}{\theta}\int\limits_{(S_*)}\left(\sigma_u^a u_u^a + \sigma_{u\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{u\phi}^a u_\phi^a\right)\cdot h\cdot h_\phi\cdot d\theta\, d\phi\,, \tag{26}$$

де S_* – приведена поверхня інтегрування, що прирівнюється до поверхні витягнутого сфероліта (до поверхні витягнутого еліпсоїда обертання, софокусного з сферолітом); u_u^a, u_θ^a, u_ϕ^a – однорідні поля переміщень, які виражаються з таких рівнянь:

$$u_u^a = \hat{\gamma}_{12}\frac{r\cdot\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}}{4\left(\operatorname{sh}^2 u_* + \sin^2\theta\right)^{0,5}}\left(\operatorname{ch}^2 u_* + \operatorname{sh}^2 u_*\right)\cdot\sin 2\theta\cdot\cos\phi,$$
$$u_\theta^a = \hat{\gamma}_{12}\frac{r\cdot\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}}{4\left(\operatorname{sh}^2 u_* + \sin^2\theta\right)^{0,5}}\operatorname{sh}2u_*\cdot\cos 2\theta\cdot\cos\phi, \tag{27}$$
$$u_\phi^a = -\hat{\gamma}_{12}\frac{r\cdot\left(\lambda^2-\lambda^{-1}\right)^{0,5}}{2}\cdot\operatorname{ch}u_*\cdot\cos\theta\cdot\sin\phi,$$

σ_u^a, $\sigma_{u\theta}^a$, $\sigma_{u\phi}^a$ – однорідні поля напружень, які визначаються з таких виразів:

$$\sigma_u^a = \frac{\hat{\sigma}_{12}}{2\left(\mathrm{sh}^2 u_* + \sin^2\theta\right)} \cdot \mathrm{sh}\, 2u_* \cdot \sin 2\theta \cdot \cos\phi,$$

$$\sigma_{u\theta}^a = \frac{\hat{\sigma}_{12}}{\mathrm{sh}^2 u_* + \sin^2\theta} \cdot \left(\mathrm{sh}^2 u_* \cdot \cos^2\theta - \mathrm{ch}^2 u_* \cdot \sin^2\theta\right) \cdot \cos\phi, \tag{28}$$

$$\sigma_{u\phi}^a = -\frac{\hat{\sigma}_{12}}{\mathrm{sh}^2 u_* + \sin^2\theta} \cdot \mathrm{sh}\, u_* \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi,$$

де u_* – зміщення на приведеній поверхні інтегрування S_*.

Ефективний модуль пружності при повздовжньому зсуві G_{12} визначаємо з другого представлення пружної енергії:

$$\frac{\hat{\sigma}_{12}}{G_{12}} = \frac{1}{\theta} \int_{(S_*)} \left(\sigma_u^a u_u^a + \sigma_{u\theta}^a u_\theta^a + \sigma_{u\phi}^a u_\phi^a\right) \cdot h \cdot h_\phi \cdot d\theta\, d\phi\,, \tag{29}$$

Інтегруючі вираз (26) і (29) з врахуванням рівнянь (21), (22), (24), (25), а також (27) і (28), опускаючи громіздкі викладки перетворення, отримаємо вираз ефективного модуля пружності при повздовжньому зсуві:

$$G_{12} = E_a \frac{G1}{G2}, \tag{30}$$

де

$$\begin{aligned} G1 = {} & \left\{E_c\left(1+\nu_a\right) + 2E_a\left(1-2\nu_c\right) + 2\chi^2\left[E_c\left(1-2\nu_a\right) - E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\right\}\left\{\left[E_c\left(1+\nu_a\right) + 2E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\times\right. \\ & \times\left\{3\left[E_a\left(1+\nu_c\right)\beta_1^{**} + E_c\left(1+\nu_a\right)\beta_3^{**}\right] + 2\chi^2\left(1+\nu_a\right)\left[E_c\left(1+\nu_a\right) - E_a\left(1+\nu_c\right)\right]\left(\beta_2^{**} - \beta_4^{**}\right) + \right. \\ & \left.\left. + 2\chi^2\left(1-2\nu_a\right)\left[E_c\left(1-2\nu_a\right) - E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\left[E_a\left(1+\nu_c\right)\beta_1^{**} + E_c\left(1+\nu_a\right)\beta_3^{**}\right]\right\}\right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G2 = {} & 3\left\{E_c\left(1+\nu_a\right) + 2E_a\left(1-2\nu_c\right) + 2\chi^2\left[E_c\left(1-2\nu_a\right) - E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\right\}\left\{E_c\left[\left(1+\nu_a\right) + 2E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\times\right. \\ & \times\left\{3\left[E_a\left(1+\nu_c\right)\beta_1^{**} + E_c\left(1+\nu_a\right)\beta_3^{**}\right] + 4\chi^2\left(1+\nu_a\right)\beta_4^{**}\left[E_c\left(1+\nu_a\right) - E_a\left(1+\nu_c\right)\right]\right\} - \\ & - \chi^2\left(1+\nu_a\right)\left[E_c\left(1-2\nu_a\right) - E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\left[E_a\left(1+\nu_c\right)\beta_1^{**} + E_c\left(1+\nu_a\right)\beta_3^{**}\right] - \left\{E_c\left(1-2\nu_a\right)\left(1+\nu_a\right) + \right. \\ & + 2E_a\left(1-2\nu_c\right)\left(1-2\nu_a\right) + \chi^2\left[E_a\left(1-2\nu_c\right)\left(1+\nu_a\right) - E_c\left(1-2\nu_a\right)\left(1+\nu_c\right)\right]\Big\}\left[E_c\left(1+\nu_a\right) + \right. \\ & + 2E_a\left(1-2\nu_c\right)\Big]\left\{3\left[E_a\left(1+\nu_c\right)\beta_1^{**} + E_c\left(1+\nu_a\right)\beta_3^{**}\right] + 2\chi^2\left(1+\nu_a\right)\left(\beta_1^{**}\gamma_2^{**} - \beta_2^{**}\gamma_1^{**}\right)\left[E_c\left(1+\nu_a\right) - \right. \\ & \left.\left. - E_a\left(1+\nu_c\right)\right]\right\} + 2\chi^2\left(1-2\nu_a\right)\left[E_c\left(1-2\nu_a\right) - E_a\left(1-2\nu_c\right)\right]\left[E_a\left(1+\nu_c\right)\beta_1^{**} + E_c\left(1+\nu_a\right)\beta_3^{**}\right]\right\}, \end{aligned}$$

де χ – ступінь об'ємної кристалічності полімерного матеріалу; γ_i^{**} і β_i^{**} – функції, що визначають зміну параметрів структури полімерного матеріалу від ступеня витяжки λ при повздовжньому зсуві.

$$\gamma_1^{**} = \frac{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2\left(\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}\right)}, \qquad \gamma_2^{**} = \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} - 2\left(\lambda + 1\right)\sqrt{\lambda}\ln a}{2\left(\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}\right)},$$

$$\beta_1^{**} = 3 - 4\nu_a - \frac{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}{2\left(\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}\right)},$$

$$\beta_2^{**} = 3 - 4\nu_a - \frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} - 2\left(\lambda + 1\right)\sqrt{\lambda}\ln a}{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}},$$

$$\beta_3^{**} = -(1 - 2\nu_a)\frac{3\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1} + 2\left(\lambda + 1\right)\sqrt{\lambda}\ln a}{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}} + \frac{3\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\lambda\left(1 + \lambda^3\right)}{\left(\lambda^3 - 1\right)\left[\ln a + 2\lambda\sqrt{\lambda^3 - 1}\right]}, \tag{31}$$

$$\beta_4^{**} = \left(1 - 2\nu_a\right)\frac{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a - 2\lambda^3\sqrt{\lambda^3 - 1}}{\lambda\sqrt{\lambda}\ln a + 2\sqrt{\lambda^3 - 1}}.$$

Рівняння (30) та (31) визначають поведінку повздовжнього модуля зсуву G_{12} попередньо

орієнтованої надмолекулярної структури полімерного матеріалу сферолітної будови залежно від ступеня витяжки матеріалу λ та його пружних властивостей.

ВИСНОВКИ

Отримано аналітичні вирази, що дозволяють для заданого полімерного матеріалу визначати мінімальну деформацію зсуву в повздовжньому та поперечному до попередньої орієнтації витягнутих сферолітів напрямку, яку необхідно створити перероблюючим обладнанням для остаточного руйнування зв'язків між сферолітами або їх конгломератами, тобто для остаточного руйнування полімерів.

Отримані аналітичні залежності дозволяють перейти до проектування технологічного устаткування і визначення конструктивно-технологічних параметрів пристроїв і процесів переробки полімерних матеріалів з урахуванням їх структури.

Напруження зсуву в полімерному матеріалі можна створити, пропускаючи його між валками, виготовленими за профілем Рело, що забезпечить поперечну та повздовжню до попередньої орієнтації сферолітів деформацію зсуву. Тому в майбутньому буде розглянута схема навантаження полімерного матеріалу, на основі якої будуть отримані аналітичні залежності, що пов'язують основні технологічні та конструкційні параметри перероблюючого пристрою з валками, виготовленими за профілем Рело, з напружено-деформованим станом у полімерному матеріалі.

Література

1. Синюк О. М. Модель будови недеформованих полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 3. – С. 181–188.

2. Синюк О. М. Визначення пружних властивостей аморфно-кристалічних полімерів сферолітної структури / О. М. Синюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 6. – С. 77–86.

3. Синюк О. М. Моделювання зміни надмолекулярної структури полімерних матеріалів при орієнтаційній витяжці / О. М. Синюк, М. Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 6. – С. 45–51.

4. Синюк О. М. Метод розрахунку ефективних пружних властивостей полімерів з орієнтованою структурою / О. М. Синюк // Технічні науки і технології: науковий журнал. – Чернігів : Чернігів. нац. технол. ун-т, 2016. – № 4. – С. 16–25.

5. Синюк О. М. Визначення раціональних конструкційних параметрів пристроїв для переробки полімерів / О. М. Синюк // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2017. – № 1. – С. 53–61.

6. Ванин Г. А. Микро-механика композиционных материалов / Г. А. Ванин. – Киев : Накова думка, 1985. – 304 с.

7. Лурье А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 940 с.

8. Синюк О. М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів / О. М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 1. – С. 12–19.

References

1. Synyuk O. M. Model□ budovy nedeformovanykh polimeriv sferolitnoyi struktury, Herald of Khmelnytskyi National University, 2016, no. 3, pp. 181–188.

2. Synyuk O. M. Vyznachennya pruzhnykh vlastyvostey amorfno-krystalichnykh polimeriv sferolitnoyi struktury, Visnyk Vinnyts□koho politekhnichnoho instytutu, 2016, no. 6, pp. 77–86.

3. Synyuk O. M., Skyba M. YE. Modelyuvannya zminy nadmolekulyarnoyi struktury polimernykh materialiv pry oriyentatsiyniy vytyazhtsi, Herald of Khmelnytskyi National University, 2016, no. 6, pp. 45–51.

4. Synyuk O. M. Metod rozrakhunku efektyvnykh pruzhnykh vlastyvostey polimeriv z oriyentovanoyu strukturoyu, Tekhnichni nauky i tekhnolohiyi: naukovyy zhurnal, Chernihiv : ChNTU, 2016, no. 4, pp. 16–25.

5. Synyuk O. M. Vyznachennya ratsional□nykh konstruktsiynykh parametriv prystroyiv dlya pererobky polimeriv, Visnyk Ternopil□s□koho natsional□noho tekhnichnoho universytetu, 2017, no. 1, pp. 53–61.

6. Vanin G. A. Mikro-mekhanika kompozitsionnykh materialov, Kiev : Nakova dumka, 1985, 304 p.

7. Lur'ye A. I. Teoriya uprugosti, M. : Nauka, 1970, 940 p.

8. Synyuk O. M. Matematychna model□ anizotropnykh vlastyvostey polimernykh materialiv, Herald of Khmelnytskyi National University, 2015, no. 1, pp. 12–19.

Отримана/Received : 2.9.2017 р. Надрукована/Printed :17.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Скиба М.Є.

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 675.04:675.024:675.026

К.С. СТАДНІК, О.А. ОХМАТ
Київський національний університет технологій та дизайну
В.А. ПАЛАМАР
Київський національний торговельно-економічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНИХ МІНЕРАЛІВ У ШКІРЯНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

В шкіряній промисловості застосовують широкий асортимент хімічних матеріалів. Здебільшого це речовини імпортного виробництва, які мають значну вартість в поєднанні з низькою екологічною безпечністю. Пошук нових ефективних хімічних матеріалів вітчизняного виробництва для шкіряної промисловості є сьогодні доволі актуальним питанням. В роботі використано прийом добору та аналізу інформації щодо можливості застосування природних мінералів в технологічних процесах виробництва натуральної шкіри. У статті розглянуті питання, пов'язані з використанням природних мінералів у виробництві натуральної шкіри. Представлено окремі особливості молекулярної структури вітчизняних природних мінералів, їх основні властивості та способи модифікації для підвищення ефективності використання в шкіряній промисловості. Розглянуто способи та особливості застосування природного цеоліту та монтморилоніту в дубильних та післядубильних процесах виробництва шкіри. Описано специфічні властивості, що набуває дерма шкіряного напівфабрикату, після обробки її природними матеріалами.

Ключові слова: виробництво шкіри, природні мінерали, монтморилоніт, цеоліт, формування структури дерми.

K.S. STADNIK, O.A. OKHMAT
Kyiv National University of Technologies and Design
V.A. PALAMAR
Kyiv National University of Trade and Economics

FEATURES OF USING NATURAL MINERALS IN THE LEATHER INDUSTRY

The leather industry uses a wide range of chemical materials. For the most part, these are imported substances which are quite expensive in combination with the low environmental safety. Search of the new effective domestic chemical material for the leather industry is quite relevant problem now. In the work we used the method of selection and analysis of information about the possibility of use of natural minerals in technological processes of natural leather production. In this article considers the problem related to the use of natural minerals in leather manufacture. Features of molecular structure of the domestic clay minerals, their basic properties and modifications methods are presented to improve the efficiency of use in the leather industry. Methods and features of use of the natural zeolite and montmorillonite in the tanning and post-tanning processes of the leather manufacture are considered. Specific properties of the semi-finished leather dermis after its processing by clay materials are described. Application of clay minerals promotes intensification of technological processes due to the multifunctional materials. Works on research of conditions of the natural minerals use are appropriate and practically significant. Use of the natural minerals will not only improve the quality of the finished leather, but also make the production more environmentally friendly.

Keywords: leather manufacture, natural minerals, montmorillonite, zeolite, forming the dermis structure.

Враховуючи те, що вітчизняні запаси природних мінералів доволі великі, їх використання останнім часом стає все більш актуальним. У ґрунтах України найчастіше трапляються кварц, польові шпати, слюда, магнетит, лімоніт, кальцит, доломіт, галіт, апатит, пірит, каолініт, бентоніт, галуазит та багато інших. Майже всі ці мінерали містять домішки мікроелементів, які класифікують на первинні та вторинні. Первинні мінерали – основне джерело утворення вторинних: монтморилоніту, галуазиту, бейделіту, гідрослюди тощо. У ґрунті серед первинних мінералів найбільше польових шпатів і слюд (мусковіт, біотит, флогопіт, піроксени, рогова обманка, кварц та ін.), які становлять 75–85 %. Із вторинних мінералів найпоширеніші мінерали групи монтморилоніту – монтморилоніт, бейделіт, нонтроніт; із гідрослюд – гідробіотит, гідромусковіт, ілліт; з каолінової групи – каолініт і галуазит. Вторинні мінерали гідрофільні, і в ґрунтах концентруються у вигляді дисперсних і колоїдних часток. Дисперсні частинки утримують значну кількість вологи (монтморилоніт, наприклад, містить до 30 % води). Природні мінерали надають ґрунту липкості і пластичності, з ними також пов'язане утворення водостійких структурних агрегатів [1].

Широкий спектр властивостей природних мінералів сприяє і розширенню області їх промислового застосування. Використання у вітчизняній шкіряній промисловості різних мінералів природного походження останнім часом досліджується все частіше.

На сьогодні найбільший інтерес викликає застосування у шкіряній промисловості природного цеоліту, з його основною складовою – клиноплилолітом, та бентоніту, з його основною складовою – монтморилонітом. Обидва матеріали відносять до глинистих мінералів [2]. Цеоліт відносять до каркасних, монтморилоніт – до шаруватих силікатів. Кристалічна структура цеоліту представлена тетраедрами оксидів кремнію і алюмінію, об'єднаними в мереживні каркаси з порожнинами (комірками) однакового розміру, заповненими катіонами лужних і лужноземельних металів та молекулами води.

Кристалічна структура монтморилоніту являє собою шари, що складаються з силікатних або окисноалюмінієвих пластин. Ці пластини з'єднуються між собою в стопки; вода в структурі монтморилоніту розташовується між талькоподібними силікатними шарами. Однією з переваг застосування вказаних глинистих матеріалів при виробництві шкіри є можливість їх комбінації з іншими матеріалами органічного або мінерального походження, завдяки високій питомій поверхні глинистих матеріалів та їх властивості

високоефективних сорбентів [3].

Постановка завдання

Завданням шкіряного виробництва є отримання високоякісної шкіри зі шкур тварин для виготовлення продукції широкого вжитку. Шкіра, застосовувана для виготовлення тих чи інших речей, повинна мати комплекс необхідних властивостей, що обумовлені областю експлуатації виробів з натуральної шкіри. Виробництво натуральної шкіри, яка б мала і гарні естетичні властивості, була б м'якою, еластичною, але з високими фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями − головна задача шкіряного виробництва. Її вирішення можливе лише при дотриманні всіх технологічних вимог по контролю якості використовуваних хімічних матеріалів (основних та допоміжних), а також завдяки застосуванню прогресивних технологій виробництва шкіри.

Прогресивні технології базуються не лише на застосуванні новітніх хімічних матеріалів з поліфункціональними властивостями, але і на спрощенні самого технологічного циклу без втрати якості готової шкіри; на підвищенні екологічності власне шкіряного виробництва, яке відносять до третього класу небезпеки; отриманні шкіри з властивостями «безпечного товару». Одним зі шляхів виготовлення натуральних шкір з необхідним комплексом експлуатаційних та споживних властивостей є формування структури дерми шкіри в результаті її послідовних перетворень у технологічних процесах виробництва під впливом різних хімічних матеріалів.

Технологічні процеси виробництва натуральної шкіри поділяють на підготовчі, дубильні та післядубильні. Структура дерми шкіряного напівфабрикату формується в останніх двох циклах. В дубильних процесах – застосуванням дубильних сполук, переважно мінерального походження; в післядубильних – застосуванням комплексу матеріалів як мінеральної, так і органічної природи.

Традиційні технології [4] дубильних процесів передбачають застосування хромового дубителя, післядубильні – композиції рослинних та синтетичних дубителів і полімерних сполук. Все це порушує ряд питань пов’язаних: по-перше, з токсичністю дубильних сполук хрому, по-друге, з високою ціною імпортних рослинних дубителів та полімерних сполук, по-третє, із застосуванням фенолвмісних синтетичних дубителів. А, отже, застосування альтернативних екологічно безпечних вітчизняних матеріалів для виробництва шкіри є сьогодні питанням доволі актуальним.

Мета роботи полягає у виявленні можливості використання природних мінералів в дубильних та післядубильних процесах виробництва шкіри високої якості. Завдання роботи полягає у вивченні теоретичних принципів застосування природних мінералів в процесах виробництва шкір широкого асортименту.

Об’єкти та методи досліджень

Об’єктом дослідження є процес підвищення якості натуральної шкіри за умови застосування природних мінералів.

В роботі використано прийому добору та узагальнення інформації щодо можливості застосування глинистих мінералів у шкіряній промисловості. А саме, у процесах, що відповідають за формування структури шкіри, набуття певних фізико-хімічних, експлуатаційних та естетичних властивостей.

Результати та їх обговорення

Основним білком дерми шкур тварин є колаген. Колаген характеризується багаторівневою структурою, яка містить пори різних розмірів, що варіюються в діапазоні: мікро (пори ≤ 1 нм), мезо (1 нм ≤ пори ≤ 200 нм), макро (пори ≥ 200 нм) [5]. При проведенні дубильних та післядубильних процесів відбувається руйнування зв'язків в структурі колагену дерми, та утворення нових, в результаті реакцій білка з різними хімічними речовинами. Для ефективного формування структури дерми необхідно забезпечити структурування її елементів, тому раціонально використовувати матеріали з необхідними функціональними групами та співрозмірними (з порами дерми) частинками [6].

Традиційно для структурування колагену дерми використовують мінеральні та органічні дубителі, індивідуально або в комбінації. У виробництві 80 % натуральних шкір як у нашій країні так і закордоном в дубильних процесах застосовують хромовий дубитель, який являє собою комплексну сполуку і ефективно формує структуру дерми на різних її рівнях шляхом утворення координаційних зв'язків з карбоксильними групами колагену. Незважаючи на традиційність і відпрацьованість технології хромового дублення, її основним недоліком є неефективне використання сполук хрому (майже 40 % дубильних солей хрому залишається у відпрацьованому розчині [7]). Ще на початку 21 сторіччя Міжнародною Фінансовою корпорацією «IFC» розроблено «Керівництво з охорони навколишнього середовища, здоров’я та праці» [8], що регламентує обмежене використання сполук хрому в шкіряній промисловості. Одним з основних пунктів керівництва обумовлюється використання альтернативних агентів дублення замість хрому або в комбінації з ним без втрати якості натуральної шкіри та її унікальних властивостей. Отже, поставлене питання може бути реалізовано використанням хромзберігаючих технологій комбінованого дублення, які передбачають часткову заміну сполук хрому іншими матеріалами.

Практичний інтерес представляє використання у виробництві шкіри під час дублення глинистих матеріалів. В якості матеріалів можна використати модифіковану дисперсію монтморилоніту та пептизовану дисперсію природного цеоліту. Вельми важливою властивістю глинистих високодисперсних часток монтморилоніту є їх здатність до самоорганізації. Суспензії монтморилоніту при модифікації набувають певної структури і переходять в гельовидний стан. Для модифікації монтморилоніту та суттєвої зміни властивостей його поверхні досить використовувати обмінні катіони, наприклад Na^+ [6]. Природний цеоліт, на відміну від монтморилоніту, є каркасним мінералом, а отже, модифікації не піддається. Для отримання тонкодисперсних (1,0 мкм) фракцій цеоліту можна використати ультразвуковий або механічний методи подрібнення. Для пептизації природного цеоліту також можна використовувати поліфосфат натрію [9].

Введення мінеральних сполук в дубильні розчини інтенсифікує процес. Наприклад, суміщене застосування сполук хрому з модифікованими дисперсіями монтморилоніту [10] сприяє високому рівню відпрацювання робочих рідин під час процесу дублення, що підтверджено зменшенням на 30 %

концентрації дубильних речовин у відпрацьованих рідинах. Такий ступінь відпрацювання робочого розчину досягається за рахунок утворення додаткових зв'язків хромового дубителя з функціональними групами колагену дерми та активними центрами, власне, монтморилоніту. Технологія цікава ще й тим, що у порівнянні з типовою технологією виробництва хромових шкір для верху взуття показники хімічного та біологічного споживання кисню зменшуються мінімум в 1,5 рази, зменшуючи тим самим екологічне навантаження на навколишнє середовище. Для реалізації технології використовують дисперсію хром-монтморилоніту [11], отриману шляхом поступового додавання розчину хромового дубителя (концентрація розчину 100 г/л) до дисперсії модифікованого глинистого мінералу.

Остаточне формування структури дерми шкіри досягається в післядубильних процесах додублювання та наповнювання.

В основі успішного застосування монтморилоніту у післядубильних процесах виробництва шкіри та формування структури її дерми лежать специфічні колоїдно-хімічні властивості цього мінералу [3]. Полідисперсність, анізометрія форми, діелектрична природа частинок монтморилоніту, своєрідна хімія, реакційна здатність та висока питома поверхня дозволяють мінералу одночасно впливати на різні структурні рівні колагену та взаємодіяти з його різнофункціональними групами [12]. До того ж колоїдно-хімічні властивості монтморилоніту створюють широкі перспективи для модифікації та міцної фіксації багатозарядних аніонів, гідроксокомплексних катіонів, поверхнево-активних речовин, барвників, полімерних матеріалів тощо.

Сучасні дослідження китайський вчених [13] встановили можливість застосування модифікованих дисперсій монтморилоніту для виробництва шкіри з високими фізико-механічними показниками. Додублювання шкіряного напівфабрикату органічно-мінеральним складом на основі монтморилоніту і лігносульфонату натрію сприяє ефективному формуванню структури дерми, що підтверджується показниками об’ємного виходу, виходу площі та товщини шкіри, її високою температурою зварювання.

В роботах [14, 15] представлені ефективні технології наповнювання шкір. Завдяки сумісності монтморилоніту, модифікованого натрієвими солями, і монтморилоніту, модифікованого цис-13-декозеновою кислотою, з колагеном дерми відбуваються одночасно і процеси хімічного структурування, і процеси наповнювання-пластифікації дерми шкіряного напівфабрикату. При цьому також підвищується термостійкість та фізико-механічні властивості шкіри.

Виявлено також позитивний вплив на ефективність обробки хромового напівфабрикату нанокомпозиційними матеріалами [16], що включають модифіковану дисперсію монтморилоніту та акриловий сополімер, отриманий синтезом акрилової кислоти та альдегіду. Використання згаданого нанокомпозиційного матеріалу сприяє утворенню в структурі колагену міцних зв’язків, що проявляється у додатковому формуванні структури та підвищенні температури зварювання шкіри на 17 ºС порівняно зі зразками, виготовленими за традиційними технологіями. Причому, необхідно вказати на суттєве зменшення (на 75 % у порівнянні з типовою технологією додублювання) витрат хромового дубителя у розробленій технології.

В природному цеоліті ж, на відміну від монтморилоніту, ні за яких умов кристалічна структура мінералу не руйнується [2]. Ця структура має високу сорбційну здатність. Унікальна кристалічна решітка є своєрідним молекулярним ситом, особливо чутливим до азотовмісних сполук. А отже, цеоліт може утримувати на собі синтетичні барвники, катіонні поверхнево-активні речовини, інші матеріали, що мають азотовмісні групи. Цеоліт, за наявними дослідженнями, не вступає у зв’язок з білками та амінокислотами, але може сорбувати сполуки хрому, введені в технологічному циклі виробництва натуральної шкіри [17].

Характерною особливістю застосування дисперсій цеоліту для наповнювання шкіряного напівфабрикату є ущільнення макропористої структури дерми [12], при цьому частинки мінералу заповнюють проміжки між структурними елементами дерми, сприяючи ефективному наповнюванню периферійних ділянок, збільшенню товщини готових шкір і незначному зменшенню виходу цих шкір по площі.

Висновки

Загальний аналіз наукових робіт свідчить про можливість застосування природних мінеральних сполук у шкіряному виробництві з метою формування структури дерми в дубильних і післядубильних процесах.

Залежно від виду глинистого мінералу, його молекулярної структури, модифікуючих (або пептизуючих) реагентів, можна отримати готові шкіри з прогнозованими експлуатаційними властивостями. Поряд із цим, упровадження нових технологій формування структури дерми дисперсіями природних мінералів дозволить підвищити ефективність використання сировини, знизити витрати шкіряного підприємства на хімічні матеріали з одночасним розширенням асортименту матеріалів для дубильних і післядубильних процесів.

Необхідно також зауважити як про зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище в результаті впровадження описаних технологій, так і про підвищення безпечності шкіри як товару широкого вжитку.

Література

1. Утворення, властивості та класифікація мінералів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://collectedpapers.com.ua/soil_science/utvorennya-vlastivosti-ta-klasifikaciya-mineraliv

2. Беррі Л. Г. Мінералогія / Беррі Л. Г., Мейсон Б. Г., Дітріх Р. В. – М. : МИР, 1987. – 603 с.

3. Грищенко І. М. Поліфункціональні шкіряні матеріали : монографія / І. М. Грищенко, А. Г. Данилкович, О. Р. Мокроусова. – К. : Фенікс, 2013. – 295 с.

4. Данилкович А. Г. Технологія і матеріали виробництва шкіри : навчальний посібник / А. Г. Данилкович, О. Р. Мокроусова, О. А. Охмат. – К. : Фенікс, 2009. – 580 с.

5. Marukhlenko M. Stabilizing derma collagen structure with modified dispersions of montmorillonite / M.

Marukhlenko, O. Mokrousova, V. Palamar // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. – Vol. 111. – № 1. – P. 1–8.

6. Mokrousova O. Hide and Skin of Mammals / O. Mokrousova, Yu. Volfkovich // Structural Properties of Porous Materials and Powders Used in Different Fields of Science and Technology. – Springer London Ltd, 2014. – Part III. Chapter 12. – P. 251−266.

7. Плаван В. П. Пути повышения экологичности процесса дубления кож / В. П. Плаван, А. Г. Данилкович, М. С. Павлова // Экотехнологии и ресурсозбережение. – 2007. – № 3. – С. 52–56.

8. IFC. Міжнародна фінансова корпорація / Керівництво з охорони навколишнього середовища, здоров'я та праці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/7791eb0048865978b93efb6a6515bb18/Tanning+and+Leather+Finishing+Final_.pdf?CACHEID=7791eb0048865978b93efb6a6515bb18&MOD=AJPERES

9. Розвиток наукових основ створення формостійкого взуття з використанням мінеральних композицій : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.18 – технологія взуття, шкіряних виробів і хутра : захист 11.06.2015 / О. П. Козарь ; КНУТД. – К. : КНУТД, 2015. – 36 с.

10. Марухленко М. О. Розробка технологічних параметрів хромзбережної технології дублення шкір / М. О. Марухленко, О. Р. Мокроусова, О. А. Охмат // Вісник Хмельницького національного університету. – 2016. – № 2. – С. 258–262.

11. Mokrousova O. Resources-saving Chromium Tanning of Leather with the Use of Modified Montmorillonite / O. Mokrousova, V. Palamar, A. Danylkovych // Revista de Chimie. – 2015. – № 3. – P. 353–357.

12. Козарь О. П. Екологічно-орієнтовані технології застосування природних мінералів у виробництві шкіри / О. П. Козарь, О. Р. Мокроусова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2014. – № 1. – С. 128–136.

13. Chen Y. Nanotechnologies for leather manufacturing: A review / Y. Chen, Fan and Bi Shi // JALCA. – 2011. – Vol. 106, Issue 8. – P. 261–273.

14. Sodium montmorillonite effect on the morphology, thermal, flame retardant / G. Sanchez-Olivares, A. Sanchez-Solis, F. Calderas et al. // Applied Clay Science. – 2014. – Vol. 102. – P. 254–260.

15. Lyu B. Nanocomposite based on erucic acid modified montmorillonite/sulfited rapeseed oil: Preparation and application in leather / B. Lyu // Applied Clay Science. – 2016. – Vol. 121. – P. 36–45.

16. Отрошко В. А. Вплив полімерно-мінеральної композиції та її складових на температуростійкість колагену/ В. А. Отрошко, О. Р. Мокроусова, Н. В. Мережко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 1(221). – С. 225–231.

17. Kozar O. Formation of leather biostability with the use of cationic polyelectrolytes / O. Kozar, M. Sprynskyy, Yl. Hrechanyk, O. Okhmat, K. Lawinska, R. Rosul, V. Himych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 2/6(86). – P. 29–48.

References

1. Utvorennia, vlastyvosti ta klasyfikatsiia mineraliv [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://collectedpapers.com.ua/soil_science/utvorennya-vlastivosti-ta-klasifikaciya-mineraliv

2. Berri L. H. Mineralohiia / Berri L. H., Meison B. H., Ditrikh R. V. – M. : MYR, 1987. – 603 s.

3. Hryshchenko I. M. Polifunktsionalni shkiriani materialy : monohrafiia / I. M. Hryshchenko, A. H. Danylkovych, O. R. Mokrousova. – K. : Feniks, 2013. – 295 s.

4. Danylkovych A. H. Tekhnolohiia i materialy vyrobnytstva shkiry : navchalnyi posibnyk / A. H. Danylkovych, O. R. Mokrousova, O. A. Okhmat. – K. : Feniks, 2009. – 580 s.

5. Marukhlenko M. Stabilizing derma collagen structure with modified dispersions of montmorillonite / M. Marukhlenko, O. Mokrousova, V. Palamar // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. – Vol. 111. – # 1. – R. 1–8.

6. Mokrousova O. Hide and Skin of Mammals / O. Mokrousova, Yu. Volfkovich // Structural Properties of Porous Materials and Powders Used in Different Fields of Science and Technology. – Springer London Ltd, 2014. – Part III. Chapter 12. – R. 251−266.

7. Plavan V. P. Puty povyshenyia ekolohychnosty protsessa dublenyia kozh / V. P. Plavan, A. H. Danylkovych, M. S. Pavlova // Ekotekhnolohyy y resursozberezhenye. – 2007. – # 3. – S. 52–56.

8. IFC. Mizhnarodna finansova korporatsiia / Kerivnytstvo z okhorony navkolyshnoho seredovyshcha, zdorovia ta pratsi [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/7791eb0048865978b93efb6a6515bb18/Tanning+and+Leather+Finishing+Final_.pdf?CACHEID=7791eb0048865978b93efb6a6515bb18&MOD=AJPERES

9. Rozvytok naukovykh osnov stvorennia formostiikoho vzuttia z vykorystanniam mineralnykh kompozytsii : avtoreferat dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.18.18 – tekhnolohiia vzuttia, shkirianykh vyrobiv i khutra : zakhyst 11.06.2015 / O. P. Kozar ; KNUTD. – K. : KNUTD, 2015. – 36 s.

10. Marukhlenko M. O. Rozrobka tekhnolohichnykh parametriv khromzberezhnoi tekhnolohii dublennia shkir / M. O. Marukhlenko, O. R. Mokrousova, O. A. Okhmat // Herald of Khmelnytsky National University. – 2016. – # 2. – C. 258–262.

11. Mokrousova O. Resources-saving Chromium Tanning of Leather with the Use of Modified Montmorillonite / O. Mokrousova, V. Palamar, A. Danylkovych // Revista de Chimie. – 2015. – # 3. – P. 353–357.

12. Kozar O. P. Ekolohichno-oriientovani tekhnolohii zastosuvannia pryrodnykh mineraliv u vyrobnytstvi shkiry / O. P. Kozar, O. R. Mokrousova // Vestnyk Khersonskoho natsyonalnoho tekhnycheskoho unyversyteta. – 2014. – # 1. – S. 128–136.

13. Shen Y. Nanotechnologies for leather manufacturing: A review / Y. Chen, Fan and Bi Shi // JALCA. – 2011. – Vol. 106, Issue 8. – P. 261–273.

14. Sodium montmorillonite effect on the morphology, thermal, flame retardant / G. Sanchez-Olivares, A. Sanchez-Solis, F. Calderas et al. // Applied Clay Science. – 2014. – Vol. 102. – P. 254–260.

15. Lyu B. Nanocomposite based on erucic acid modified montmorillonite/sulfited rapeseed oil: Preparation and application in leather / B. Lyu // Applied Clay Science. – 2016. – Vol. 121. – P. 36–45.

16. Otroshko V. A. Vplyv polimerno-mineralnoi kompozytsii ta yii skladovykh na temperaturostiikist kolahenu/ V. A. Otroshko, O. R. Mokrousova, N. V. Merezhko // Herald of Khmelnytsky National University. – 2015. – # 1(221). – S. 225–231.

17. Kozar O. Formation of leather biostability with the use of cationic polyelectrolytes / O. Kozar, M. Sprynskyy, Yl. Hrechanyk, O. Okhmat, K. Lawinska, R. Rosul, V. Himych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 2/6(86). – P. 29–48.

Рецензія/Peer review : 15.06.17 р. Надрукована/Printed :07.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мокроусова О.Р.

УДК 685.34.023.4

Т.І. КУЛІК
Київський національний університет технологій та дизайну

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Стаття присвячена дослідженню процесу лиття під тиском полімерних взуттєвих виробів складної конфігурації.

У роботі розглянуто процес лиття у відкриту форму та у закриту з нижнім положенням пуансона. Після заповнення відкритої чи закритої форми розплав підпресовується за рахунок переміщення пуансона, рівномірно заповнюючи оформлюючі порожнини прес-форми. Розроблено математичну модель процесу, у результаті дослідження якої встановлені залежності витрати розплаву полімеру від кута підйому черв'яка у матеріальному циліндрі з урахуванням геометричних параметрів екструзійної головки та прес-форми при литті у форму з підйомом пуансона. З отриманих залежностей можна визначити необхідний час заповнення прес-форми та частоту обертання черв'яка для заданої витрати розплаву.

Ключові слова: полімерне взуття, лиття під тиском, інжекційно-пресове формування, технологічні параметри лиття.

T.I. KULIK
Kyiv National University of Technology and Design

MATHEMATICAL MODELING OF INJECTION MOLDING PROCESS OF POLYMER PRODUCTS OF COMPLEX CONFIGURATION

The article investigates the process of injection molding plastic shoe parts of complex configuration. This article examines the process of casting in open and in closed form at the bottom position of the punch. After filling the open or closed mold pressurizing of melt is carried out by moving the punch thus uniformly filling the cavity of the mold. The mathematical model of the process is developed, on the basis of which are established the dependencies of the volumetric speed of the polymer melt on the slope angle of worm in the cylinder considering the geometric parameters of the extrusion head and the mold when casting in the mold with lifting the punch. From these dependencies can be determined the required filling time of the mold and the worm rotational speed for a given volumetric speed of melt.

Keywords: polymeric footwear, injection molding, injection-pressing formation, molding process parameters.

Вступ

Полімери широко використовуються при виробництві різних деталей, особливо у легкій промисловості. Взуттєва галузь, як і інші галузі легкої промисловості, споживає великі обсяги полімерних матеріалів. Перевагами їх використання є: економія дорогої натуральної сировини; створення безвідходного або маловідходного виробництва; зниження трудових затрат за рахунок скорочення основних та допоміжних операцій; підвищення якості виробів за рахунок уніфікації деталей та вузлів; автоматизація виробництва; підвищення продуктивності праці та зниження собівартості виробу.

З полімерних матеріалів виготовляють деталі верху взуття та переважну більшість деталей низу: підошву і каблук та їх вузли. До вузла підошви відносять з'єднання деталей: підошва, каблук, підметка, декоративний рант, геленок тощо. До вузла каблука належать: каблук, набійка, вкладиш каблука, геленок, рант. Взуттєва промисловість також пропонує широкий асортимент суцільнополімерного взуття – чоботи, чобітки, калоші, пляжне та спортивне взуття та інші вироби.

На сьогоднішній день найбільш поширеним методом формування полімерних взуттєвих виробів є лиття під тиском.

Постановка завдання

Для підвищення конкурентоспроможності взуття необхідно забезпечити його високі експлуатаційні показники. Реалізувати це можна за рахунок включення до конструкції підошви взуття різного роду активних елементів, таких, як антиковзні стрижні, трубчасті або стрижневі амортизатори та інші вставки [1-2]. Ускладнення конструкції підошви вимагає удосконалення технологічного процесу лиття на основі математичного моделювання заповнення прес-форми.

Рис. 1. Наповнення відкритої пресс-форми

Аналіз досліджень та публікацій

Для полімерних виробів складної конфігурації можна запропонувати метод лиття у відкриту форму з подальшим її закриттям та компресією за рахунок переміщення пуансона [3] (рис. 1). Такий спосіб забезпечує рівномірне заповнення прес-форми із затіканням розплаву в усі ділянки її оформлюючої порожнини. У цьому випадку тиск на розплав у формі створюється не тільки зусиллям інжекції, а й за рахунок пресового механізму вузла змикання.

Якщо ж виріб при складній конструкції не містить високих штирів чи інших подібних елементів, то

можна рекомендувати лиття у закриту прес-форму з підпресовуванням її після заповнення за рахунок підйому пуансона.

У обох випадках необхідно розробити рекомендації щодо параметрів технологічного процесу, які б забезпечили виготовлення рівноміцного виробу з високими експлуатаційними показниками.

Формулювання цілей

Метою дослідження є розроблення математичної моделі процесу виготовлення взуттєвих виробів складної конфігурації із активними елементами або суцільно формованого полімерного взуття, який здійснюється шляхом наповнення прес-форми у відкритому або закритому стані при нижньому положенні пуансона, з подальшим підпресуванням за рахунок переміщення останнього.

Виклад основного матеріалу

В роботі [4] було отримано вираз для визначення витрати розплаву в матеріальному циліндрі литтєвої машини (рис. 2):

$$Q=\frac{1}{2}\cdot\pi^2\cdot D^2\cdot N\cdot H\cdot\sin\varphi\cdot\cos\varphi-2\cdot\pi\cdot D\cdot(\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1}\cdot\left(\frac{1}{\mu}\cdot\frac{P}{L}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot\frac{1}{\frac{1}{n}+2}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}, \quad (1)$$

де D – діаметр черв'яка; N – частота обертання черв'яка; H – висота каналу; φ – кут підйому витків черв'яка; n – індекс течії розплаву; μ – коефіцієнт консистенції розплаву; P – тиск лиття; L – довжина матеріального циліндра.

Якщо розплав витікає через насадку з циліндричним каналом, то тиск перед каналом дорівнює перепаду тиску в каналі, оскільки при литті у відкриту форму тиск в кінці каналу дорівнює атмосферному.

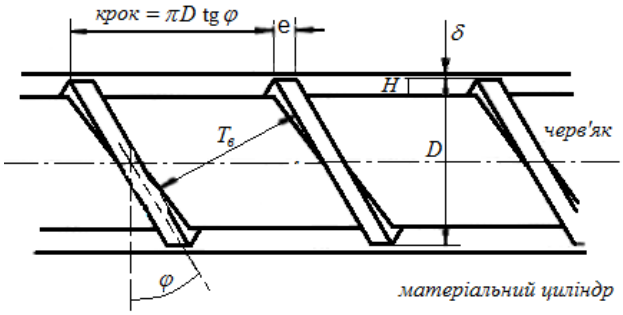


Рис. 2. Геометричні параметри черв'яка литтєвої машини

Перепад тиску в каналі, згідно [5]:

$$P=\Delta P=2\mu\cdot l\cdot\left[\frac{\left(\frac{1}{n}+3\right)Q}{\pi R_к^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n, \quad (2)$$

де l – довжина ливникового каналу; $R_к$ – радіус ливникового каналу.

Підставляючи (2) в (1), отримаємо:

$$Q=\frac{1}{2}\cdot\pi^2\cdot D^2\cdot N\cdot H\cdot\sin\varphi\cdot\cos\varphi-2\cdot\pi\cdot D\cdot(\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1}\cdot\frac{1+3n}{1+2n}\cdot\left(\frac{2l}{L}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}\cdot\frac{Q}{\pi\cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}}, \quad (3)$$

звідки витрата розплаву визначиться у вигляді:

$$Q=\frac{\frac{1}{2}\cdot\pi^3\cdot D^2\cdot N\cdot H\cdot\sin\varphi\cdot\cos\varphi\cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}}{1+2\cdot\pi\cdot D\cdot(\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1}\cdot\frac{1+3n}{1+2n}\cdot\left(\frac{2l}{L}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}}. \quad (4)$$

Якщо отворів у насадці більше одного, то тиск перед насадкою буде:

$$P=\Delta P=2\cdot\mu\cdot l\cdot\left[\frac{\left(\frac{1}{n}+3\right)\cdot\frac{Q}{k}}{\pi\cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}}\right]^n. \quad (5)$$

де k – кількість отворів у насадці.

У такому випадку витрата розплаву дорівнюватиме:

$$Q=\frac{\frac{k}{2}\cdot\pi^3\cdot D^2\cdot N\cdot H\cdot\sin\varphi\cdot\cos\varphi\cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}}{1+2\cdot\pi\cdot D\cdot(\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1}\cdot\frac{1+3n}{1+2n}\cdot\left(\frac{2l}{L}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}}. \quad (6)$$

На рис. 3. наведена залежність об'ємної витрати розплаву від швидкості обертання черв'яка.

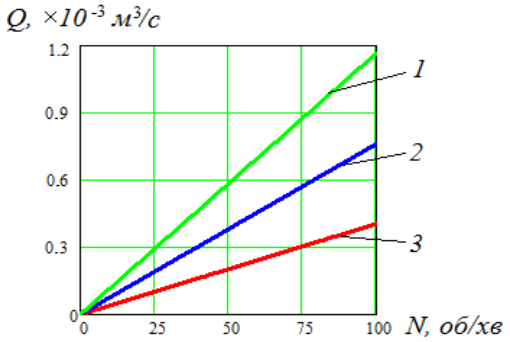


Рис. 3. Залежність об'ємної витрати розплаву від швидкості обертання черв'яка при куті підйому витків черв'яка: *1* – $\varphi = 10°$; *2* – $\varphi = 20°$; *3* – $\varphi = 40°$

З рис. 3 випливає, що витрата розплаву прямо пропорційна швидкості обертання черв'яка.

Враховуючи, що витрата розплаву $Q = \frac{V}{t}$, з (6) отримаємо вираз для визначення часу заповнення прес-форми:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{2V \cdot \left[1 + 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{1+3n}{1+2n} \cdot \left(\frac{2l}{L}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2} \right]}{k \cdot \pi^3 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}} \tag{7}$$

З виразу (6) можна отримати вираз для визначення частоти обертання черв'яка при заповненні прес-форми з усталеною витратою розплаву:

$$N = \frac{2Q \cdot \left[1 + 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{1+3n}{1+2n} \cdot \left(\frac{2l}{L}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2} \right]}{k \cdot \pi^3 \cdot D^2 \cdot H \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}}. \tag{8}$$

На рис. 4. наведено залежність швидкості обертання черв'яка від часу заповнення прес-форми:

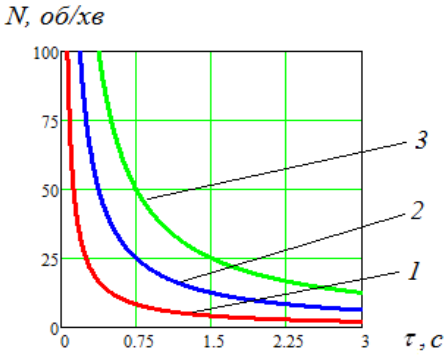


Рис. 4. Залежність швидкості обертання черв'яка від часу заповнення прес-форми при швидкості течії розплаву: *1* – $V = 100 \cdot 10^{-6}$ м³; *2* – $V = 300 \cdot 10^{-6}$ м³; *3* – $V = 600 \cdot 10^{-6}$ м³

Як видно з рис. 4, зменшення швидкості заповнення менше 1 сек. потребує значного підвищення швидкості обертання черв'яка. При цьому, із збільшенням об'єму прес-форми необхідна величина підвищення швидкості обертання черв'яка зростає.

У випадку, коли конфігурація оформлюючої поверхні прес-форми не включає глибокі порожнини для формування складних елементів, доцільно її заповнення здійснювати у закритому стані, з нижнім положенням пуансона, при подальшому підпресуванні розплаву за рахунок підйому пуансона (рис. 5).

а *б*

Рис. 5. Схема процесу заповнення прес-форми при литті підошов з гумових сумішей на заготовку верху взуття: *а* – стадія упорскування; *б* – стадія витримки під тиском

Витрата неньютонівської рідини під час течії в каналі пов'язана з перепадом тиску:

$$Q = K \cdot (\Delta P)^{\frac{1}{n}}, \tag{9}$$

де K – коефіцієнт, що відповідає каналу радіуса R довжиною L.

Вважаючи, що градієнт тиску в прес-формі $\frac{dP}{dx} = \frac{\Delta P}{l}$, можна отримати:

$$Q = \frac{\pi \cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}}{2 \cdot \left(\frac{1}{n}+3\right) \cdot \mu \cdot l^{\frac{1}{n}}} \cdot (\Delta P)^{\frac{1}{n}} \tag{10}$$

або

$$K = \frac{\pi \cdot R_к^{\frac{1}{n}+3}}{2 \cdot \left(\frac{1}{n}+3\right) \cdot \mu \cdot l^{\frac{1}{n}}}. \tag{11}$$

Для насадки матеріального циліндра:

$$Q = K_d \cdot (P - P_d)^{\frac{1}{n}}. \tag{12}$$

Для прес-форми:

$$Q = K_m \cdot (P - P_m)^{\frac{1}{n}}. \tag{13}$$

У виразах (12) і (13) індекси d і m відносяться до насадки і прес-форми відповідно.

Вважаючи, що в процесі наповнення форми у випадку лиття з підйомом пуансона $P_m = 0$, з (12) і (13) отримаємо:

$$K_d \cdot (P - P_d)^{\frac{1}{n}} = K_m \cdot P_d^{\frac{1}{n}}. \tag{14}$$

і

$$P_d = \frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n} \cdot P. \tag{15}$$

Тоді (12) і (13) набудуть вигляду:

$$Q = K_d \cdot \left(1 - \frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot P^{\frac{1}{n}}. \tag{16}$$

$$Q = K_m \cdot \left(\frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot P^{\frac{1}{n}}. \tag{17}$$

Отже, отримаємо:

$$K_m \cdot \left(\frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot P^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 NH \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi - \frac{2\pi D}{\frac{1}{n}+2} \cdot (\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1} \left(\frac{P}{\mu L}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}, \tag{18}$$

звідки тиск в матеріальному циліндрі:

$$P=\left[\frac{\frac{1}{2}\cdot\pi^2\cdot D^2\cdot N\cdot H\cdot\sin\varphi\cdot\cos\varphi}{K_m\cdot\left(\frac{K_d^n}{K_m^n+K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}}+\frac{2\cdot\pi\cdot D\cdot(\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}}{\left(\frac{1}{n}+2\right)\cdot(\mu\cdot L)^{\frac{1}{n}}}}\right]^n. \quad (19)$$

Підставляючи (19) в (1) отримаємо витрату розплаву:

$$Q=\frac{1}{2}\pi^2D^2NH\sin\varphi\cos\varphi-\frac{\pi^3D^3NH\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}\cos\varphi(\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+2}\cdot}{\left(\frac{1}{n}+2\right)K_m(\mu L)^{\frac{1}{n}}\left(\frac{K_d^n}{K_m^n+K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}}+2\pi D(\sin\varphi)^{\frac{1}{n}+1}\left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}}. \quad (20)$$

Висновки

Розроблена математична модель процесу виготовлення взуття з активними елементами та суцільно формованого полімерного взуття, який здійснюється шляхом наповнення прес-форми у відкритому стані при нижньому положенні пуансона, з подальшим підпресуванням за рахунок переміщення останнього.

У результаті дослідження отриманої математичної моделі встановлені залежності витрати розплаву від кута підйому черв'яка у матеріальному циліндрі з урахуванням геометричних параметрів екструзійної головки та прес-форми при литі у форму з підйомом пуансона.

Література

1. Hennig E. M. The influence of soccer shoe design on playing performance: a series of biomechanical studies / Hennig E. M., Sterzing, T. // Footwear Science. – 2010. – Vol. 2, No. 1 – P. 3–11.

2. Hilgers M. P. Evolution of Soccer Shoe Design / Hilgers M. P., Walther M. // International Journal of Athletic Therapy & Training. – 2011. – Vol. 16 – P. 1–4.

3. Основы технологии переработки пластмасс : учебник для вузов / [С. В. Власов, Л. Б. Кандырин, В. Н. Кулезнев и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Химия, 2004. – 600 с.

4. Кулік Т. І. Математичне моделювання процесу течії розплаву полімерного матеріалу в матеріальному циліндрі інжекційної машини / Т. І. Кулік, Б. М. Злотенко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2016. – № 6(104). – С. 11–17.

5. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров / Торнер Р. В. – М. : Химия, 1977. – 464 с.

References

1. Hennig E. M. The influence of soccer shoe design on playing performance: a series of biomechanical studies / Hennig E. M., Sterzing, T. // Footwear Science. – 2010. – Vol. 2, No. 1 – P. 3–11.

2. Hilgers M. P. Evolution of Soccer Shoe Design / Hilgers M. P., Walther M. // International Journal of Athletic Therapy & Training. – 2011. – Vol. 16 – P. 1–4.

3. Osnovy tekhnolohyy pererabotky plastmass : uchebnyk dlia vuzov / [S. V. Vlasov, L. B. Kandyryn, V. N. Kuleznev y dr.]. – 2-e yzd., yspr. y dop. – M. : Khymyia, 2004. – 600 s.

4. Kulik T. I. Matematychne modeliuvannia protsesu techii rozplavu polimernoho materialu v materialnomu tsylindri inzhektsiinoi mashyny / T. I. Kulik, B. M. Zlotenko // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. – 2016. – # 6(104). – S. 11–17.

5. Torner R. V. Teoretycheskye osnovy pererabotky polymerov / Torner R. V. – M. : Khymyia, 1977. – 464 s.

Рецензія/Peer review : 21.04.2017 р. Надрукована/Printed :20.08.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Зенкін М. А.

УДК 677.076.6

Л.В. ПОЛІЩУК, О.В. КАЛАШНИК, О.В. КИРИЧЕНКО
Вищий навчальний заклад Укоопспілки «Полтавський університет економіки і торгівлі»
С.Е. МОРОЗ
Полтавський кооперативний коледж

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СТОЛОВОІ БІЛИЗНИ, ЩО ІМПОРТУЄТЬСЯ В УКРАЇНУ

Проведено експериментальні дослідження серветок бавовняних, що імпортуються в Україну із Туреччини за критеріями ідентифікації та показниками якості. Проаналізована їх якість та обґрунтовано можливості включення обраних показників в номенклатуру для оціночної та експертної діяльності.

Ключові слова: серветка, лінійні розміри, маркування, сировинний склад, розривальне навантаження, капілярність, зміна лінійних розмірів після мокрого оброблення.

L.V. POLISCHUK, O.V. KALASHNYK, O.V. KYRYCHENKO
Poltava University of Economics and Trade
S.E. MOROZ
Poltava Cooperative College

IDENTIFICATION AND EVALUATION OF QUALITY OF TABLE-LINEN THAT IS IMPORTED TO UKRAINE

The aim of the article is an exposure of criteria, indexes of identification and determination of basic indexes of quality of napkins cotton. The object of experimental researches was napkin that is imported to Ukraine from Turkey. Indexes of quality can be plugged in a nomenclature for evaluation and expert activity. For researches select indexes components of raw material composition, breaking loading, capillarity, and change of linear dimensions after wet processing, presence of defects of textile material and sewing. During researches there were the educed defects of original appearance of textile material, sewing, linear sizes. Therefore napkins do not answer the requirements of standards. Also napkins do not answer standards on indexes breaking loading warp wise, capillarity and change of linear dimensions after washing. Thus, napkins are off-grade.

Keywords: a napkin, linear sizes, marking, raw material composition, breaking loading, capillarity, change of linear dimensions after wet processing.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. Текстильні матеріали, що використовуються у виробництві предметів домашнього вжитку відрізняються за сировинним складом – із натуральних волокон та їх різних поєднань; за способом виробництва – ткані, неткані, трикотажні; за структурою – полотняного, сатинового, жакардового, дрібно візерункового переплетення; за обробкою – сурові, вибілені, гладко фарбовані, пістряво ткані, меланжеві та вибивні.

Це різноманіття текстильних матеріалів сприяє постійному оновленню асортименту різних виробів домашнього вжитку і столової білизни зокрема. Тому, виготовлення скатертин, серветок, рушників та їх різновидів потребує професійного вибору матеріалів, які б оптимально та бездоганно забезпечували виконання практичних функцій під час роботи офіціантів у сфері громадського харчування, захисту меблів, одягу відвідувачів ресторанів кафе від випадкових пошкоджень напоями, стравами, а також створювали б відповідні враження, емоції, настрій в цілому користувачів від естетичного задоволення предметами на певних заходах, подіях, церемоніях, шоу і в конкретних умовах.

Правильно і гармонійно підібраний для декорування текстиль прикрашає стіл, надає йому вишуканості та гостинності. Саме скатертини, серветки є важливою характеристикою престижу для ресторану, кафе, адже відвідувачі звертають на них увагу як тільки сідають за стіл. Цей факт є однією з найважливіших вимог правильного професійного підбору текстилю для столових виробів. Важливо врахувати призначення виробу, тему заходу, розмірні ознаки, спосіб використання. Тому такий підхід полегшить догляд за виробами і особливо утримання в бездоганній чистоті та подовжить строк їх служби [2].

Дослідження критеріїв ідентифікації та показників якості для виробів сучасного асортименту столової білизни з текстилю є необхідним, доцільним, особливо з уточнення вимог щодо характеристик асортименту, кількісних показників визначальних властивостей з метою встановлення відповідних нормативів з орієнтацією на вимоги стандартів.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор. Як свідчить аналіз джерел літератури [1–6] у асортименті та споживних властивостях столової білизни відбулися зміни за рахунок використання в їх виробництві нових видів сировини (антимікробне бамбукове волокно, штучні целюлозні волокна ліоцел, модал та танцел), вдосконалення параметрів будови (за рахунок виразніших тканих узорів дрібно візерункових, вафельних, жакардових переплетень та їх комбінації), видів оздоблення завдяки сучасним нано-, біо- і хімічним технологіям. Зокрема, в процесах вибілювання замість хлорорганічних відбілювачів використовують пероксид водню, що зберігає у цих виробах достатню зносостійкість та підвищену гігієнічність і екологічну безпечність. В оздобленні білизняних тканин широко застосовуються оптичне вибілювання, вибивні рисунки, спеціальні види оброблення (антимікробне, брудовідштовхувальне, гідрофільне).

Завдяки різноманіттю текстильних матеріалів розширюється видовий асортимент столової білизни, так як використовується в базовій, верхній та нижній скатертинах, серветках, рушниках, які є ознакою фірмового стилю [7]. Переважно основним матеріалом для них є тканина, яка повинна забезпечувати довготривалість у використанні зі збереженням форми, володіти високою міцністю, стійкістю до розтягування, відповідати тактильним вимогам, бути достатньо м'якою й шовковистою при необхідній поверхневій щільності.

Тканини різної структури, поверхневої щільності, кольорового забарвлення використовуються у нижніх скатертинах, так званих мулетонах, основними функціями яких є захист стільниці від пошкоджень та поглинання звуків під час користування посудом за столом, стримуванні ковзання основної (базової) скатертини. Також тканини використовуються в наперонах (верхніх скатертинах), які повинні служити не лише прикрасою столу, але і бути практичними, зручними у догляді і зберігати в період експлуатації естетичні властивості, що виражаються параметрами поверхні (фактурою, білістю, кольором, блиском, туше тощо).

Широко тканини використовуються для виготовлення підтарільників, серветок, які використовують відвідувачі ресторанів, кафе та обслуговуючий персонал для оформлення столу і конкретної роботи офіціанта. Їх поділяють за способом використання – святкові, на кожний день; за призначенням – столові, чайні, банкетні, інтер'єрні, декоративні; за формою та розмірами.

Та можливості текстилю не вичерпні і у сучасному суспільному житті помічені спеціалістами з креативного оформлення подій, заходів, церемоній, методом, так званого, івент-дизайну і, зокрема, кейтерінгу (виїзному обслуговуванні).

Використовуючи знання з визначальних характеристик виробів столової білизни із текстилю дизайнери через сучасне оформлення столу конкретної події формують враження від сприйняття нового, особливого, від побаченого, що впливає на настрій, емоції та отримання задоволення в цілому. При цьому враховуються об'єктивні і притаманні текстилю показники, що чинять емоційно-естетичну дію на споживача, дослідника. Це насамперед фактура поверхні (гладка, рівна, шорстка, узорно-гладка, узорно-рельєфна, ворсова, повстеподібна), білість, колір, рисунок, блиск (м'який, різкий, шовковистий, приглушений, сріблястий, скляний), прозорість, жорсткість, драпірувальність.

Для професійної частини спеціалістів сфери обслуговування, офіціантів зокрема, важливі не лише естетичні характеристики текстильних матеріалів, а й ті, що впливають на надійність під час багаторазового використання та сприяють виконанню основних функцій.

Тому, виявлення критеріїв та показників тканин для столової білизни, які формують її якість в цілому і за якими можливо ідентифікувати в любих ситуаціях є важливим, так як за стандартною номенклатурою показників якості відповідно до ДСТУ 3047-95 Тканини та ткані вироби поштучні. Класифікація та номенклатура показників якості для скатертин і серветок обмежена кількість обов'язкових показників, яка включає ступінь стійкості фарбування до різних фізико-хімічних впливів (для пофарбованих тканин), відповідність художньо-колористичного оформлення та структури матеріалу (виробу) зразку-еталону, ступінь білості (для вибілених тканин), а з рекомендованих – питому в'язкість розчину целюлози.

Для виробів столової білизни, на нашу думку, в номенклатуру потрібно було б включити показники здатності тканини вбирати воду і інші рідини (водовбирання, капілярність), стійкість тканини до утворення складок під час зминання (коефіцієнт незминальності, %), зміну лінійних розмірів (зміна лінійних розмірів після мокрих обробок, %).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Ринок текстильних товарів в Україні насичений різноманітними товарами вітчизняного та закордонного виробництва. Проте рівень їх якості не завжди відповідає вимогам нормативних документів, очікуванням споживачів тощо. Серветки є одним з найважливіших елементів декорування столу і прикраси інтер'єру. З'ясовано, що серветки для сервірування столу виконують не тільки естетичну, але і практичну функцію – захист одягу від випадкових крихт і крапель їжі. Зараз серветки виготовляють з найрізноманітніших тканин і при їх виборі важливо звернути особливу увагу саме на показники їх якості. Оцінювання матеріалу для виготовлення серветок дозволить полегшити догляд, утримання їх у бездоганній чистоті, продовжити термін їх служби.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Цілі полягають у виявленні та визначенні критеріїв, показників ідентифікації серветок, дослідженні комплексу основних показників їх якості, які можуть бути використані в номенклатурі для оціночної та експертної діяльності.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Об'єктом дослідження була серветка вишита Arya (артикул 1500116 асорті) виробництва TURKUAZ TEKSTI (Туреччина), зовнішній вигляд якої представлений на рисунку 1.

Рис. 1. Зовнішній вигляд серветки вишитої Arya (артикул 1500116 асорті)

Відповідно до мети проведена ідентифікація та дослідження обраних показників якості серветок Arya (артикул 1500116 асорті) за таким алгоритмом:

- огляд пакування серветок та реквізитів їх маркування;
- огляд зовнішнього вигляду виробу;
- встановлення виду переплетення текстильного матеріалу;
- виявлення можливих дефектів;
- визначення лінійних розмірів виробу;
- визначення ширини шва при обробці країв по довжині виробу;
- визначення числа стібків на 10 см;
- встановлення компонентів сировинного складу;
- визначення розривального навантаження смужки тканини розміром 50х200 мм;
- визначення показника капілярності;
- визначення показника зміни лінійних розмірів після мокрих обробок.

Оглядом зовнішнього вигляду пакування встановлено, що серветка упакована у пачку білого кольору, виготовлену із склеєного картону з триклапанним дном і кришкою із замком. На зворотній стороні пачки типографським способом нанесені реквізити маркування на турецькій та російській мовах, зверху на яких закріплена паперова клейка етикетка на українській мові (рис. 2).

Рис. 2. Фотографічне зображення елементів маркування, що нанесені на пакування серветки Arya

Окрім того, додатковим елементом маркування виявлена контрольна стрічка, як вшита у шов виробу, реквізити маркування якої показані на рисунку 3.

Рис. 3. Фотографічне зображення контрольної стрічки, що вшита у шов серветки Arya, із нанесеними на неї реквізитами

Серед них виявлено логотип торгової марки Arya турецького підприємства виробника TURKUAZ TEKSTIL; написи – home collection, що дає можливість віднести серветки до колекції домашнього вжитку; 100 % бавовна (на п'яти мовах) та зазначення символів по догляду за виробом. Отже, реквізити маркування нанесені на товарний ярлик дублюються на контрольній стрічці і містять ідентичну інформацію.

Споживче маркування на товарному ярлику та контрольній стрічці чітко нанесені типографським способом, має однозначну інформацію, яка забезпечує споживача необхідною та доступною інформацією відповідно до вимог ДСТУ 4519:2006 Непродовольчі товари. Споживче маркування товарів легкої промисловості. Загальні правила. Відповідно до п. 4.6 цього стандарту на споживчому маркуванні товарів легкої промисловості, і серветки в тому числі, зазначена інформація, перелік якої представлений в таблиці 1.

Таблиця 1

Наявні реквізити маркування серветки Arya

№	Назва реквізиту	Характеристика реквізиту
	Обов'язкова інформація	
1	Назва країни-походження	Туреччина
2	Товарний знак (за наявності), назва та місце розташування виробника	TURKUAZ TEKSTIL, Туреччина, м. Стамбул, вул. Генчгурк, буд. 33, тел. (90)2125110692)
3	Назва товару / виробу	Серветка вишита
4	Артикул товару / виробу	Артикул 1500116 асорті
5	Модель товару / виробу	Arya
6	Розміри	50x70
7	Вміст сировини	100% бавовна
8	Дата виготовлення	2014
9	Символи щодо догляду	Наявні (рис. 2)
10	Інформація щодо сертифікації товару / виробу за наявності	Товар Сертифицирован ГОСТ 28253-89,7779-75
11	Штриховий код товару	3000000003114
	Специфічна та додаткова інформація про виріб для споживача	
12	Найменування імпортера, його товарний знак та місцезнаходження	ТОВ «АРІЯ ТЕКСТИЛЬ» (Україна, м. Вишгород, вул. Новопромислова, буд. 2А, тел. (044) 593-85-80)
13	Термін придатності	Необмежений
14	Кількість виробів	1 шт.

Аналізом реквізитів маркування встановлено, що вони відповідають вимогам ДСТУ 4519:2006 та зазначені в повному обсязі. Проте, аналіз інформації щодо сертифікації серветки Arya (артикул 1500116 асорті) показав, що на виробі зазначені знак сертифікації РФ та така нормативна документація: ГОСТ 28253-89 Ткани шелковые и полушелковые плательные и плательно-костюмные. Общие технические условия та ГОСТ 7779-75 Ткани и изделия штучные шелковые и полушелковые. Нормы устойчивости окраски и методы ее определения. Ця інформація не відповідає зазначеному сировинному складу серветки, є недостовірною і вводить в оману споживача, дослідника щодо її сертифікації.

Під час проведення огляду зовнішнього вигляду серветки Arya (артикул 1500116 асорті) було з'ясовано, що це виріб широкого вжитку, за інформацією маркування бавовняний, гладко фарбований, кремового кольору з машинною підрубкою країв однострочковим швом. Тканина серветки виготовлена різними переплетеннями, які підкреслюють фактурність поверхні, а саме, вдосконаленим вафельним, полотняним, шашковим; ламаною саржею.

Завдяки огляду були виявлені дефекти зовнішнього вигляду серветки. При цьому на поверхні серветки був виявлений дефект пошиття – відсутність сформованого шва краю серветки, що виник внаслідок неправильного підгину краю (рис. 4).

Рис. 4. Фотографічне зображення дефекту пошиття (відсутність сформованого шва краю) серветки вишитої Arya

Близько до краю серветки Arya виявлений дефект ткацького переплетення – обірвані нитки основи (рис. 5).

Рис. 5. Фотографічне зображення місця виявленого дефекту ткацького переплетення (обірвані нитки основи) серветки Arya

Обірвані нитки основи відповідно до ДСТУ 2291-93 є дефектом у вигляді незароблених ниток основи, що виступають на поверхні тканини.

Отже, виявлені дефекти зовнішнього вигляду досліджуваної серветки Arya, дають змогу заключити, що її якість не відповідає вимогам ГОСТ 9470-71 Изделия штучные хлопчатобумажные, из пряжи химических волокон и смешанные. Определение сортности.

Аналізом результатів вимірювання лінійних розмірів серветки Arya встановлено, що середнє значення її лінійних розмірів складає 48,1х68,5 см і не відповідає зазначеним на маркуванні (50х70 см).

Краї по довжині серветок оброблені на швейній машині швом у підгин з закритими зрізами. Результати їх вимірювань представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати вимірювання країв

№	Назва показника	Значення показника	
		за ГОСТ 11027-80	виміряне
1	Ширина шва при обробці країв по довжині, не більше, см	0,6	1,2
2	Ширина шва при обробці кінців штучних виробів, не більше, см	1,0	1,5

Дослідженнями встановлено, що за показниками ширини шва при обробці країв і кінців якість серветки Arya не відповідає вимогам ГОСТ 11027-80 Ткани и штучные изделия хлопчатобумажные махровые и вафельные. Общие технические условия.

Нормоване число стібків на 10 см у штучних виробах столової білизни встановлено не менше 25. Дослідження показало, що число стібків на 10 см серветок Arya складає 23. Це значення також не відповідає вимогам ГОСТ 11027-80.

У зв'язку із виявленою інформацією щодо сировинного складу і зазначеної сертифікації за невідповідними стандартами було проведено дослідження зі встановлення компонентів сировинного складу серветки. Для визначення компонентів сировинного складу серветки Arya провели світлову мікроскопію за допомогою мікроскопу УМ 301, відповідно до вимог ДСТУ 4057-2001 Матеріали текстильні. Метод ідентифікації. Результати світлової мікроскопії представлені на рисунку 6.

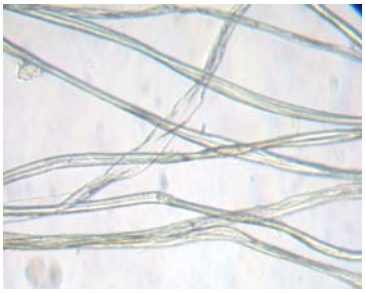


Рис. 6. Фотографічне зображення мікроскопічного препарату з визначення складників сировинного складу серветки Arya

Як бачимо на зображенні, у складі ниток серветки Arya наявні лише волокна бавовни. Отже, за встановленим показником компонентів сировинного складу серветки Arya відповідають реквізитам зазначеним на маркуванні.

Особливо важливим показником для експлуатації столової білизни є показник міцності тканини, що визначали на розривній машині РМ-250 М шляхом розірвання смужки розміром 50х200 мм за методикою ГОСТ 3813-72 Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении (рис. 7).

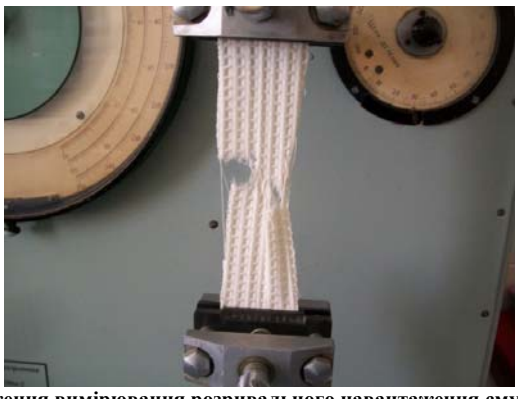
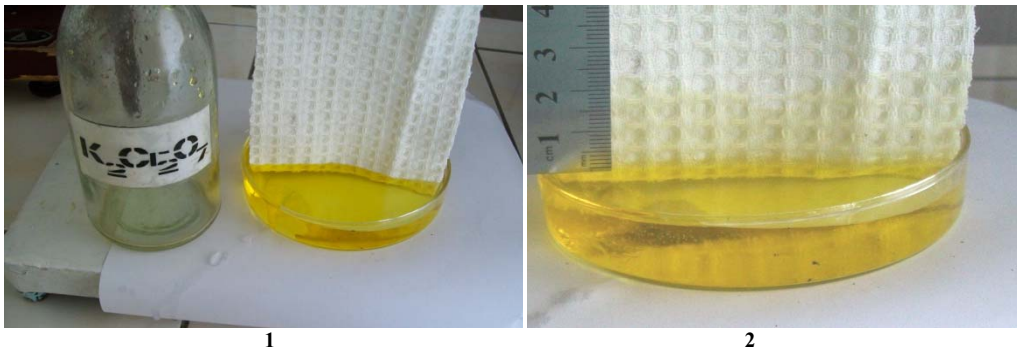


Рис. 7. Фотографічне зображення вимірювання розривального навантаження смужки тканини серветки Arya

У результаті проведених досліджень був встановлений показник розривальне навантаження на момент розірвання смужки тканини розміром 50х200 мм, числове значення якого представлено в таблиці 3.

Важливим показником якості серветок вважаємо показник капілярності, який виміряли відповідно до методики ГОСТ 3816-81 Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств (рис. 8).



1 **2**

Рис. 8. Фотографічне зображення визначення капілярності смужки тканини: 1 – початок вимірювання; 2 – завершення вимірювання

Результати проведених досліджень наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати дослідження виміряних показників якості серветки Arya

№	Назва показника	Значення показника		Відповідність вимогам ГОСТ 11027-80
		відповідно ГОСТ 11027-80	виміряне	
1	Розривальне навантаження Н (кгс) (середнє значення) по основі по утоку	559 (57) 294 (30)	285 (30) 305 (30)	Не відповідає Відповідає
2	Капілярність, не менше, мм за 30 хв	100	21	Не відповідає

Відповідно до алгоритму проведення досліджень визначили показник зміна лінійних розмірів після мокрих обробок за методикою ГОСТ 30157.0-95 Полотна текстильные. Методы определения изменения размеров после мокрых обработок или химической чистки. Общие положения, ГОСТ 30157.1-95 Полотна текстильные. Методы определения изменения размеров после мокрых обработок или химической чистки. Режимы обработок. Отриманий результат вимірювання і розрахунку складає в напрямку основи 8,5%, а – утоку 14,0%. Відхилення надто значні, особливо порівняно з допустимими нормами за цим показником для бавовняних тканин (5% в напрямку основи, 2% в напрямку утоку).

Аналіз результатів дослідження показав, що об’єкт дослідження – серветка вишита Arya не відповідає вимогам ГОСТ 11027-80 за показниками ширина шва при обробці країв по довжині та кінців; число стібків на 10 см; розривальне навантаження; капілярність та зміна лінійних розмірів після прання.

Висновки. За результатами дослідження серветки Arya виявлені дефекти зовнішнього вигляду виробу (тканини, пошиття), відхилення за лінійними розмірами, показниками розривального навантаження по основі, капілярності, зміни лінійних розмірів після мокрих обробок.

Імпортерам столової білизни з Туреччини потрібно було б заручитися документом, що підтверджує, декларує їх якість та аналізувати зазначені реквізити у маркуванні щодо сертифікації.

Враховуючи аналіз нормативної документації на номенклатуру показників якості в частині скатертин та серветок, пропонуємо доповнити групу обов'язкових показників таким показником як капілярність, який характеризує здатність тканини вбирати рідину (нормативи на нього зазначені в технічних умовах ГОСТ 11027-80). Окрім того, в номенклатуру доцільно включити такі показники як зміна лінійних розмірів після мокрих обробок (%) (столові вироби і серветки, зокрема, піддаються частому пранню, що впливає на їх надійність та термін служби) та стійкість тканини до утворення складок під час зминання (коефіцієнт незминальності, %).

Отримані результати дослідження серветок, що надійшли із Туреччини, засвідчують можливість їх ідентифікації за реквізитами маркування, критеріями і показниками зовнішнього вигляду (тканини, її переплетення, лінійними розмірами, сировинного складу) та визначальними показниками якості.

Під час проведення подальших досліджень виробів столової білизни важливо з'ясувати наскільки може бути використаний для оцінювання їх якості показник водовбирання, який характеризує можливість тканини сорбувати воду.

Література

1. Виды столового белья [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.justlady.ru/articles-141901-vidy-stolovogo-belya#ixzz4GO7GfJYX. – Назва з екрану.

2. Салфетки [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.teksline.com.ua/page/cRestaurants_napkins.html. – Назва з екрану.

3. Кричевський Г. Е. Нано-, био-, химические технологии и производство нового поколения волокон, текстиля и одежды / Г. Е. Кричевский. – М. : Изд-во «Известия», 2011. – 528 с.

4. Пушкар Г. О. Інтер'єрний текстиль: товарознавчі аспекти формування асортименту та якості : монографія / Г. О. Пушкар. – Львів : «Магнолія 2006». 2013 – 176 с.

5. Семак Б. Д. Інноваційні види сировини для виробництва інтер'єрного екотекстилю / Б. Д. Семак, Г. О. Пушкар // Торгівля, комерція, підприємництво : зб. наук. праць. – Львів. 2014. – Випуск 17. – С. 198–200.

6. Пушкар Г. О. Інтер'єрний текстиль: товарознавчі аспекти формування вітчизняного ринку та шляхи оптимізації асортименту [Електронний ресурс] / Пушкар Г. О., Семак Б. Д. – Режим доступу : http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=166. – Назва з екрану.

7. Формування асортименту і якості тканин для опорядження підприємств ресторанного господарства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.15 / Г. В. Озимок ; Київ. нац. торг.-екон. ун-т. – К., 2011. – 21 с.

8. Суворова О. К. Визначення композиційно-технологічних ознак скатертин у івент-дизайні (для кайтерінгу) [Електронний ресурс] / О. К. Суворова, Г. Б. Бондар // Технології та дизайн. – 2013. – № 3. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2013_3_16.

References

1. Vydy stolovoho belia. Web Resource. URL http://www.justlady.ru/articles-141901-vidy-stolovogo-belya#ixzz4GO7GfJYX.

2. Salfetky Web Resource. URL http://www.teksline.com.ua/page/cRestaurants_napkins.html.

3. Krychevskyi H. E. Nano-, byo-, khymycheskye tekhnolohyy y proyzvodstvo novoho pokolenyia volokon, tekstylia y odezhd y. Moscow, Yzvestyia, 2011, 528 p.

4. Pushkar H. O. Interiernyi tekstyl: tovaroznavchi aspekty formuvannia asortymentu ta yakosti: monografiya. Lviv, Mahnoliia 2006, 2013, 176 p.

5. Semak B. D., Pushkar H. O. Innovatsiini vydy syrovyny dlia vyrobnytstva interiernoho ekotekstyliu. Torhivlia, komertsiia, pidpryiemnytstvo: Zb. nauk. prats. Volume(Issue) 17. Lviv, 2014, pp. 198-200.

6. Pushkar H. O., Semak B. D. Interiernyi tekstyl: tovaroznavchi aspekty formuvannia vitchyznianoho rynku ta shliakhy optymizatsii asortymentu. Web Resource. URL http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=166.

7. Ozymok H. V. Formuvannia asortymentu i yakosti tkanyn dlia oporiadzhennia pidpryiemstv restorannoho hospodarstva: avtoref. Kyiv, 2011, 21 p.

8. Suvorova O. K., Bondar H. B. Vyznachennia kompozytsiino-tekhnolohichnykh oznak skatertyn u ivent-dyzaini (dlia kaiterinhu), Tekhnolohii ta dyzain, 2013, No 3. Web Resource. URL http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2013_3_16.

Рецензія/Peer review : 22.05.2017 р. Надрукована/Printed :09.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кожушко Г.М.

УДК 378.677

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

ВИКОРИСТАННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ ОДЯГУ ДЛЯ ДІТЕЙ

В роботі розроблені варіанти дитячого сарафану та комбінезону з використанням засобів і прийомів морфологічної трансформації, що дозволило підвищити універсальність, утилітарність та довговічність їх функціональних елементів та виробів в цілому.

Ключові слова: морфологічна трансформація, раціональний гардероб, фактичний гардероб, бажаний гардероб, сарафан, комбінезон.

VIKTORIYA VASYLIVNA MYTSA, OKSANA MYKOLAYIVNA DOMBROVSKA
Khmelnytsky National University

USE OF TRANSFORMATION FOR THE DESIGN OF CLOTHES FOR CHILDREN

The principle of transformation is of fundamental importance in the formation of modern clothes of various purposes, therefore, in this work the classification of the basic principles of the transformation of details of the design of clothes was made, which made it possible to reveal the types of structural connections of transformed parts and elements of clothing in a children's wardrobe. In this paper a fundamentally new approach to the design and implementation of children's multifunctional clothes is offered through the self-complete set by the consumer of any details and elements of products, which allows to extend the life of clothes, use it for various needs and even fundamentally change its functions and appearance. The offered multifunctional items of clothing, the transformation of which takes place with a minimum of time, can satisfy the needs of a modern child living in an active dynamic life, and, moreover, save on resources that are extremely relevant from the point of view of the environmental problems facing the whole society.

Keywords: morphological transformation, rational wardrobe, actual wardrobe, desired wardrobe, sundress, overalls.

Вступ

Спосіб життя сучасних дітей, технології виробництва одягу, які стрімко розвиваються, постійна зміна функціональних процесів життєдіяльності людини є основними причинами появи одягу, здатного задовольнити всі вимоги людини і відповідати різним її запитам і потребам. Споживач, що знаходиться у взаємозв'язку з усіма аспектами свого життя, а також з навколишнім середовищем, звичайно, зацікавлений експлуатувати одяг, який дозволяє йому відчувати комфортність і естетичне задоволення незалежно від умов його експлуатації. Тому гардероб дітей повинен постійно поповнюватися новим одягом і його елементами. При цьому реалізується бажання використовувати ці речі як багатофункціональні (в різних поєднаннях і в різноманітних ситуаціях). Уже в 20-і роки XX століття проектування багатофункціональних речей стає одним із завдань дизайнерів і конструкторів. Прихильники даного напрямку отримали назву "Функціоналістів". Їх підхід до проектування (прагнення створити універсальні речі) здатний задовольнити запити людини і, крім того, дозволяє економити ресурси, що є надзвичайно актуальним з точки зору екологічних проблем, які стоять перед сучасним суспільством.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Науковці протягом багатьох років працюють над вдосконаленням процесу проектування дитячого одягу. Вагомий внесок у теорію і практику проектування дитячого одягу внесли такі вчені, як Коблякова Є.Б., Шершньова Л.П., Бескоровайная Г.Л., Славінська А.Л., Шамухітдінова Л.Ш, Куренова С.В., та інші. Їхні роботи присвячено визначенню залежностей відповідності розмірів одягу фігурі людини, вивченню показників якості різних видів виробів у системі «навколишнє середовище – одяг – людина», принципів проектування та створення одягу.

Аналіз літературних джерел показав, що достатньо обмежена кількість робіт та досліджень, присвячених розробці конструкцій дитячого одягу на основі принципів трансформації. На сучасних підприємствах відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо розробки дитячого одягу на основі принципів трансформації.

Мета і завдання дослідження

Мета даної роботи – розробка технічних рішень трансформованого одягу для дітей з розширеними функціями для забезпечення можливості його використання в різних життєвих ситуаціях.

Основними завданнями дослідження є:

- дослідити можливість застосування принципів трансформації в одязі для дітей на рівні виробництва;
- підготувати вихідні дані для розробки конструкцій трансформованого одягу для дітей;
- розробити варіанти трансформації дитячого одягу різного асортименту.

Виклад основного матеріалу

Відомості про трансформацію, які містяться в науково-технічній літературі, дозволяють зробити висновок про те, що створення предметів зі структурою, здатною до видозміни, завжди було одне з суттєвих напрямів в формоутворенні. З цим напрямком було пов'язане забезпечення багатьох важливих функцій людської життєдіяльності. Таким чином, принцип трансформації має фундаментальне значення в формоутворенні сучасного одягу різного призначення, а сама трансформація існує і як частина художньої

моделі світу, і як одна з ланок творчого методу.

На рисунку 1 представлена класифікація основних принципів трансформації деталей конструкції одягу на рівні виробництва (проектна трансформація), яка має три самостійних напрямки: трансформація деталей конструкції, трансформація поверхні деталей і трансформація на основі технології. Кожен з напрямків є самостійним принципом трансформації стосовно проектування одягу в умовах промисловості.

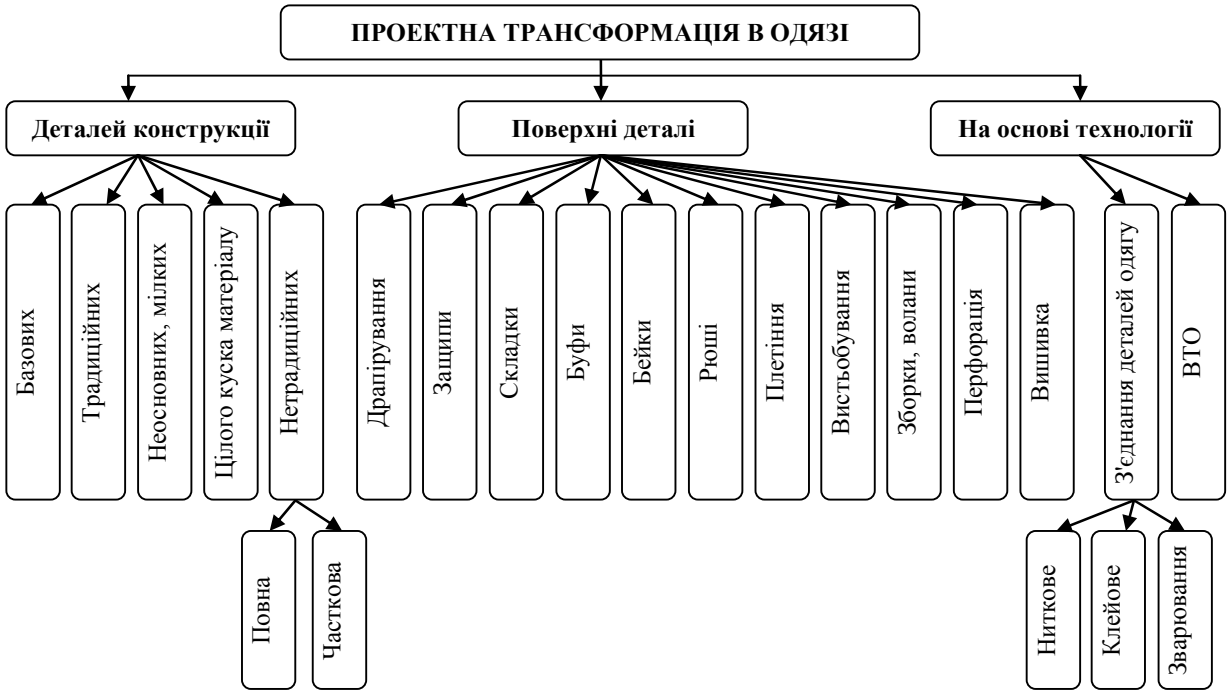


Рис. 1. Класифікація основних принципів трансформації деталей конструкції одягу

За основу даної класифікації вибралися істотні ознаки трансформації – її принципи, застосування яких в практиці проектування сприяє істотному розширенню можливостей видозміни зовнішнього вигляду виробу і його форми. Це і складає сутність і новизну даної класифікації, яка може застосовуватися на початкових стадіях проектування одягу (як з тканини, так і з трикотажного полотна) при постановці проектних завдань і визначенні загальної стратегії проектної роботи по створенню багатофункціональних моделей одягу різного асортименту, який відповідає вимогам споживачів.

Характер трансформації деталей конструкції і її варіанти виробляються в процесі визначення нових форм на основі передпроектного дослідження тенденцій моди сьогоднішнього дня і загальновідомих прийомів моделювання та конструювання. Тут деталі є трансформованою системою з безліччю варіантів їх комбінаторики.

Істотним фактором у зміні зовнішнього вигляду моделей відіграє трансформація поверхні деталей в результаті застосування драпірувань, защипів, складок, буф, бейок, рюш, воланів, перфорації, вишивки і т.п.

При виготовленні одягу і створенні його форми особливе місце займає трансформація на основі технології, до якої відносяться методи з'єднання деталей і ВТО. Їх вибір і якість виконання в значній мірі відображаються на візуальній оцінці товарного вигляду виробу, занижують або підвищують його естетичні властивості. При трансформації деталей готового виробу зустрічаються як постійні, так і тимчасові структурні зв'язки між деталями.

Постійні зв'язки (машинна строчка) існують в тих вузлах одягу, які не змінюються при трансформації.

Тимчасові зв'язки зустрічаються в деталях виробів, які при трансформації підлягають перегрупуванню. Вони здійснюються за допомогою різної фурнітури: кнопок, крючків, застібок-блискавок, ремінців, пряжок, ґудзиків, шнурків і т. п.

Типи структурних зв'язків трансформованих деталей і елементів в дитячому одязі представлені на рисунку 2. Схема комбінаторики деталей готового виробу буде для кожної конкретної моделі строго індивідуальна.

Для зміни зовнішнього вигляду виробу і розширення функціональної сфери у верхньому одязі використовують додаткові деталі, які змінюють форму виробу. Наприклад, капюшон у куртці, що складається у комір чи додаткова деталь кокетки спинки, яка служить для її утеплення, знімні рукави куртки, частини деталей пілочки і т.д. при цьому відбувається використання внутрішнього об'єму складового елементу форми виробу, збільшення або зменшення шарів утеплювального матеріалу [1, 2].

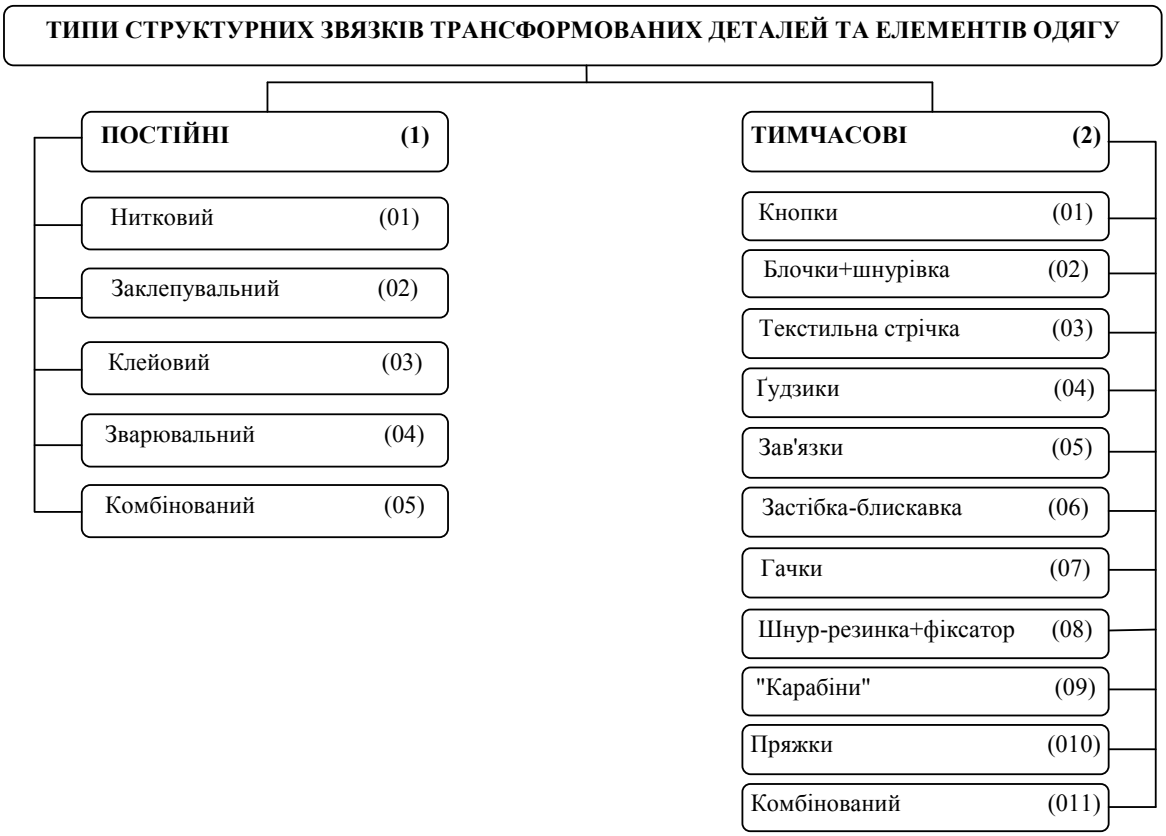
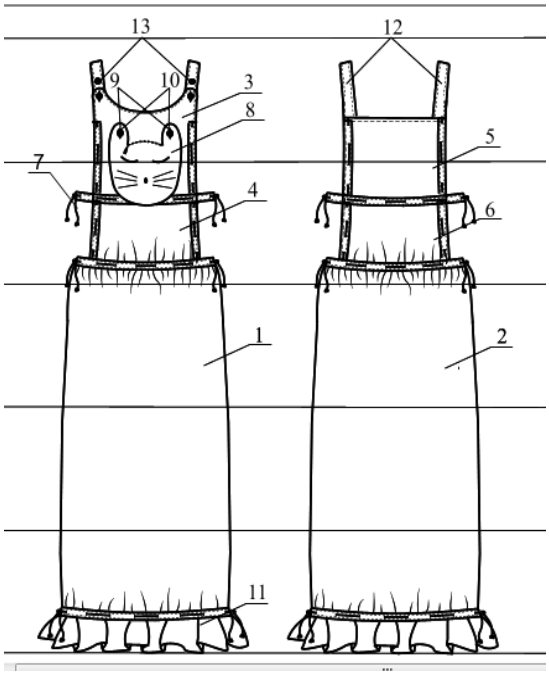


Рис. 2. Типи структурних зв'язків трансформованих деталей і елементів одягу в дитячому гардеробі

На сьогоднішній день існує дитячий одяг з елементами трансформації, але при цьому основні деталі конструкції такого одягу не змінюються. У даній роботі пропонується принципово новий підхід до проектування та реалізації дитячого багатофункціонального одягу шляхом самостійної комплектації споживачем будь-яких деталей та елементів виробів, що дозволяє подовжити термін експлуатації одягу, використовувати його для різноманітних потреб та навіть кардинально змінювати його функції та зовнішній вигляд. Ідея принципово нового підходу до дизайн-проектування дитячого багатофункціонального одягу полягає в створенні унікальних функціональних частин, деталей одягу та їх комплектації. Завдання полягає в розробці компонентів одягу, що могли б поєднуватися та доповнювати один одного в залежності від потреб, збільшувати |його функціональність, корегувати об'єм, розміри та, навіть, кардинально змінювати зовнішній вигляд моделі.

Основне призначення дитячого одягу - забезпечення утилітарного і естетичного комфорту для нормальної життєдіяльності дитини. Крім того, для батьків істотним критерієм при виборі дитячого одягу є баланс ціни і якості. Проектування дитячого одягу на основі +принципів трансформації дозволить підвищити його універсальність, розширити функціональні можливості, продовжити терміни активної експлуатації, скоротити витрати на його придбання. Як уже відзначено вище, інтерес до одягу, здатного трансформуватися, існує протягом всієї історії людства. Створення такого одягу завжди було пов'язане із забезпеченням багатьох важливих функцій життєдіяльності людини. Завданням дослідження є розширення асортименту і функціональних можливостей дитячого одягу з використанням принципів трансформації. Для цього розглянемо багатофункціональний сарафан.



а) б)

Рис. 3. Загальний вигляд виробу: а) вигляд спереду; б) вигляд ззаду

Запропоноване технічне рішення (рис. 3) виконане для дівчаток молодшої шкільної групи і складається з переднього 1 і заднього 2 полотнищ спідниці, нероз'ємно з'єднаних між собою в бічних швах; роз’ємними верхньої 3 та нижньої 4 частин пілочки, а також верхньої 5 та нижньої 6 частин спинки, які з’єднані між собою за допомогою тасьми 7 протягнутої в петлі верхньої 3 та нижньої 4 частин пілочки, а також верхньої 5 та нижньої 6 частин спинки; роз’ємної кишені-сумки 8, яка кріпиться до пілочки на дві

петлі 9 та ґудзики 10, а також на тасьму 7, протягнуту в петлі, які розміщені на задній частині; роз'ємної оборки 11, яка кріпиться до верхнього, або нижнього зрізів спідниці за допомогою тасьми 7, а також до нижнього зрізу топа; лівої та правої бретелей 12, які нероз'ємно кріпляться до спинці та регулюються на пілочці за допомогою ґудзиків 13.

Причому на всіх деталях, що з'єднуються один з одним за допомогою тасьми і петель, петлі розташовані рівномірно по окружності деталі з однаковим кроком. З'єднання здійснюється шляхом поєднання петель деталей, що з'єднуються і протягуванням через ці петлі тасьми.

Трансформація відбувається в 3 етапи:

- Трансформація в різні види сарафану;
- Трансформація сарафану в поясні вироби;
- Трансформація сарафану в плечові вироби.

Трансформація дитячого сарафану описана нижче.

1. Сарафан зі спідницею максі та оборкою. Оборка 11 від'єднується від нижнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці максі шляхом витягування тасьми 7 з петель оборки 11 і нижнього краю спідниці. Оборка 11 накладається і приєднується до верхнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці за допомогою тасьми 7, яка вставляється в петлі оборки 11 та верхній зріз спідниці.

2. Сарафан зі спідницею максі без оборки. Оборка 11 від'єднується від верхнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці максі шляхом витягування тасьми 7 з петель по верхньому краю спідниці та оборки 11.

3. Сарафан зі спідницею балон без оборки. Нижній зріз переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці приєднується за допомогою тасьми 7 до внутрішньої сторони спідниці максі. Таким чином, затягнувши тасьму 7 утворюється сарафан зі спідницею балон.

4. Сарафан зі спідницею балон та оборкою. Тасьма 7 витягується з верхнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці. Оборка 11 накладається на верхній зріз переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці балон, та затягується за допомогою тасьми 7, яка вставляється в петлі оборки 11, а також петлі верхнього та нижнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці.

Трансформація дитячого сарафану в поясні вироби описана нижче.

1. Спідниця балон з оборкою по лінії талії. Нижня частина пілочки 4 та спинки 6 від'єднується від верхнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці балон шляхом витягування тасьми 7 по верхньому краю спідниці та нижньому краю ліфу. Оборка 11 накладається на верхній зріз переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці балон, та затягується за допомогою тасьми 7, яка вставляється в петлі оборки 11, а також петлі верхнього та нижнього зрізів переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці.

2. Спідниця балон без оборки. Оборка 11 від'єднується від верхнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці балон шляхом витягування тасьми 7 з петель країв спідниці та оборки 11.

3. Спідниця максі без оборки. Нижній зріз спідниці балон від'єднується від верхнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ шляхом витягування тасьми 7 з петель верхнього та нижнього країв спідниці.

4. Спідниця максі з оборкою по нижньому зрізу. Оборка 11 накладається на нижній зріз переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці максі, та затягується за допомогою тасьми 7, яка вставляється в петлі нижнього зрізів переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці.

5. Спідниця максі з оборкою по лінії талії. Оборка 11 від'єднується від нижнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці максі шляхом витягування тасьми 7 з петель нижнього зрізу спідниці та оборки 11. Оборка 11 накладається на верхній зріз переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці максі, та затягується за допомогою тасьми 7, яка вставляється в петлі оборки 11, а також петлі верхнього зрізу переднього 1 та заднього 2 полотнищ спідниці.

Трансформація дитячого сарафану в плечові вироби описана нижче.

1. Топ з кишенею. Верхні частини пілочки 3 та спинки 5 від'єднується від нижніх частин пілочки 4 та спинки 6 шляхом витягування тасьми 7 з петель нижніх зрізів пілочки 3 та спинки 5, а також верхніх зрізів частин пілочки 4 та спинки 6. Нижні частини пілочки 4 та синки 6 приєднуються до бічних зрізів пілочки 3 та спинки 5 шляхом накладання їх у вертикальному положенні, причому з'єднання деталей здійснюється з кроком два до одного (дві петлі нижніх частин пілочки 4 та спинки 6 з'єднуються з одною петлею верхніх частин пілочки 3 та спинки 5 по краях деталей, які з'єднуються.

2. Топ з кишенею та оборкою. Оборка 11 накладається на нижній зріз пілочки 3 та спинки 5 затягується за допомогою тасьми 7, яка вставляється в петлі оборки 11, а також петлі нижнього зрізу топа.

3. Топ з оборкою та сумкою. Кишеня 8 від'єднується від пілочки 3 шляхом витягування тасьми 7 з петель нижніх зрізів частин пілочки 3 та спинки 5, а також від'єднання кишені-сумки відбувається за допомогою ґудзиків 9, які розміщені на пілочці 3, та петель, які розташовані в верхній частині кишені-сумки.

4. Топ. Оборка 11 від'єднується від нижніх зрізів пілочки 3 та спинки 5, та бічних зрізів пілочки 4 та спинки 6 шляхом витягування тасьми 7 з петель нижнього топа та оборки 11.

Таким чином, в результаті виконаних робіт запропоновано 15 варіантів трансформації дитячого сарафану. Отже, запропонований виріб можна вважати багатофункціональним.

Комбінезон – це предмет верхнього одягу, що представляє собою з'єднання верхньої частини одягу і штанів або шортів. Метою дослідження є розширення функціональних можливостей даного предмету одягу. Запропонований для подальшої трансформації комбінезон представлений на рис. 4 та містить: пілочку 1, на якій розміщена центральна застібка на ґудзики і петлі, а також спинку 2, які нероз'ємно з'єднані між собою

в бічних та плечових зрізах; верхню частину передньої 3 та задньої 4 половинок штанів, які роз'ємно з'єднані з нижньою частиною передньої 5 та задньої 6 половинок штанів за допомогою тасьми 7; рукави 8, які роз'ємно з'єднані з пілочкою 1 та спинкою 2; капюшон 9, який роз'ємно з'єднаний з пілочкою 1 та спинкою 2, та містить декоративну шнурівку 10. На всіх деталях, що з'єднуються одна з одного за допомогою тасьми і петель, так само, як і в попередньому виробі, петлі розташовані рівномірно по окружності деталі з однаковим кроком. Це виконується для того, щоб сарафан (див. рис. 3) та комбінезон (рис. 4) могли бути взаємозв'язаними між собою при взаємозаміні предметів трансформації виробів.

Трансформація дитячого комбінезону поділяється на 5 етапів:

- Трансформація з штанами;
- Трансформація з шортами;
- Трансформація в сукню;
- Трансформація в плечові вироби;
- Трансформація в поясні вироби.

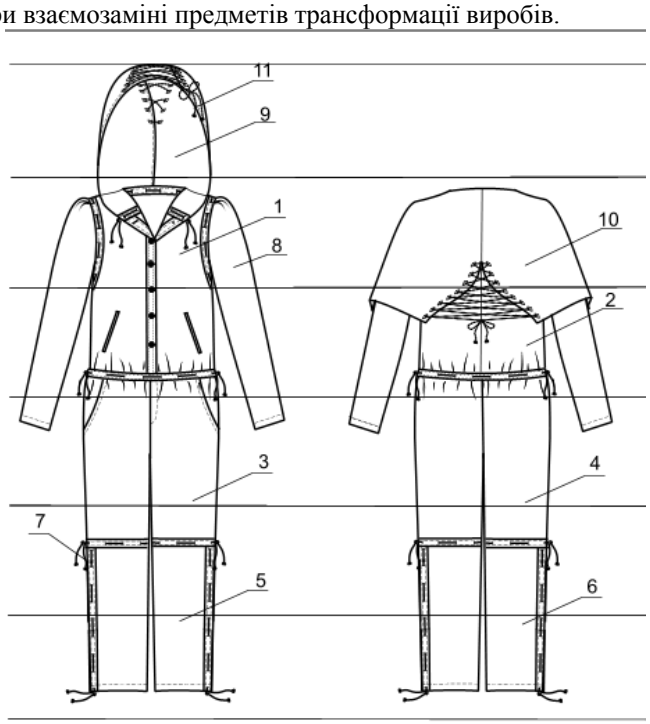
Аналогічно процедурам, представленим для дитячого сарафану вище, в результаті виконаних робіт запропоновано 27 варіантів трансформації комбінезону. Отже виріб можна вважати багатофункціональним.

Головною умовою трансформації виробів є їх багатофункціональність.

Унікальністю даних розробок є те, що пропонується об'єднання технічних рішень трансформацій сарафану (див. рис. 3) та комбінезону (див. рис. 4).

Об'єднання трансформацій дитячого сарафану та комбінезону відбувається в 7 етапів:

- Трансформація верхньої частини сарафану та нижньої частини комбінезону;
- Трансформація куртки та нижньої частини сарафану;
- Трансформація безрукавки та нижньої частини сарафану;



а) б)

Рис. 4. Загальний вигляд комбінезону: а) вигляд спереду; б) вигляд ззаду

- Трансформація куртки з капюшоном та нижньої частини сарафану;
- Трансформація безрукавки з капюшоном та нижньої частини сарафану;
- Трансформація безрукавки з розгорнутим капюшоном та нижньої частини сарафану;
- Трансформація куртки з розгорнутим капюшоном та нижньої частини сарафану;

При об'єднанні предметів трансформації сарафану та комбінезону, було запропоновано 32 варіанти різноманітних виробів для дітей молодшої шкільної вікової групи.

Висновки

Таким чином, будь-яке рішення в конструкції трансформованого одягу направлене на розширення функціональних можливостей. При цьому деталі вставки можуть мати різну форму і ширину донизу, а також бути виконані з основної або оздоблювальної тканини, що урізноманітнює модельні особливості одягу. Ті вироби, які трансформуються та мають багатофункціональне призначення сьогодні відносяться до модного сучасного одягу підвищеного попиту. Пропоновані багатофункціональні предмети одягу, перетворення яких відбуваються з мінімальною затратою часу, здатні задовольнити запити сучасної дитини, яка живе активним динамічним життям, а крім того, дозволяють економити ресурси, що є надзвичайно актуальним з точки зору екологічних проблем, які стоять перед всім суспільством.

Література

1. Муминова У.Т. Системное проектирование комплектов одежды для детей ранних возрастов / У.Т. Муминова, С.Ш. Ташпулатов. – Т. : "Fan va texnologiya", 2012. – 168 с.

2. Харьковская Г.Г. Совершенствование практического использования приемов морфологической трансформации при проектировании одежды / Г.Г Харьковская. – Благовещенск : Изд-во АмГУ, 2013. – 112 с.

References

1. Mumynova U.T. Systemnoe proektyrovanye komplektov odezhdy dlya detey rannykh vozrastov / U.T. Mumynova, S.Sh. Tashpulatov. – T.: "Fan va texnologiya", 2012. – 168 s.

2. Khar'kovskaya H.H. Sovershenstvovanye praktycheskoho yspol'zovanyya pryemov morfolohycheskoy transformatsyy pry proektyrovanyy odezhdy / H.H Khar'kovskaya. – Blahoveshchensk: Yzd-vo AmHU, 2013. – 112 s.

Рецензія/Peer review : 09.07.2017 р. Надрукована/Printed :09.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мандзюк І.А.

УДК 004:67/68

П.Ф. ЗОЗУЛЯ, О.С. ПОЛІЩУК, А.О. ПОЛІЩУК
Хмельницький національний університет

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ В ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

В даній статті проведено аналіз сучасного стану легкої промисловості та перспективи її розвитку за допомогою новітніх технологій. Розглянуто області застосування технології 3d-друку у різних галузях промисловості та приведені характерні напрямки її застосування в легкій промисловості, зокрема під час виготовлення одягу і взуття та деталей в галузевому машинобудуванні.

Ключові слова: легка промисловість, 3d-технологія, 3d-друк, 3d-принтер, полімерні матеріали.

P.F. ZOZULIA, O.S. POLISCHCHUK, A.O. POLISCHUK
Khmelnytsky National University

PERSPECTIVES FOR THE USE OF 3D-PRINT TECHNOLOGY IN THE LIGHT INDUSTRY

In this article an analysis of the current state of light industry and the prospects for its development with the help of the latest technologies are conducted. Areas of application of technology of 3d-printing in different industries are considered and the characteristic directions of its application in light industry are given, in particular in the manufacture of clothes and footwear and details in branch engineering. Also, thanks to 3D printing, experts in various fields will be able to explore the market as effectively as possible, arming with ready-made prototype prototypes of products, and also create several variations of prototypes of the same product at once. The analysis of recent researches and publications has been carried out.

Key words: light industry, 3d-technology, 3d-printing, 3d-printer, polymer materials.

Вступ

Легка промисловість – галузь української економіки з нелегкою долею. В радянський час вона ніколи не знаходилася в числі пріоритетних галузей, а на початку 90-х років двадцятого століття виробництво впало в декілька разів. На даний час почалося її поступове відновлення за рахунок появи малих та середніх підприємств по виробництву одягу, взуття і аксесуарів, що знайшли свою нішу на ринку. Для того щоб в майбутньому добитися значного успіху підприємствам легкої промисловості необхідно вгадувати тренди світової моди і засвоювати сучасні технології та обладнання.

Які тренди будуть визначати розвиток галузі в найближчі роки? Проходить заміщення вартісних тканин з натуральної сировини (льону, бавовни, вовни і інших) на нові синтетичні матеріали. Крім цього зростає попит на високотехнологічні «розумні тканини», наприклад, на тканини, що самоочищаються, світяться, акумулюють сонячну енергію тощо.

Ще один тренд – персоналізація одягу і розвиток малих виробництв з використанням 3D-друку. Застосування 3D-друку при виготовленні одягу та взуття дасть змогу вивести швейну і взуттєву промисловість на новий рівень.

3D-друк – це одна з найбільш революційних технологій нашого часу та одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні і прості у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів та з різними механічними і фізичними властивостями за один процес складання.

Технології 3D-друку завойовують світ і це справжня науково-технічна революція, яка відбувається на наших очах. Дивлячись на швидкість втілення в повсякденне життя ідей, ще недавно фантастичних, таких, як виготовлення способом об'ємного друку протезів кистей рук людини, вже не тільки футурологи, а й фахівці впевнено кажуть про прийдешні значні зміни в житті людського суспільства. 3D-друк часто називають «магічною» технологією. Ви розробляєте щось у CAD, запускаєте на друк, і через кілька хвилин постає повністю сформований об'єкт. У реальності 3D-процес друку вимагає багато ручної праці. Величезна кількість попередньої підготовки і подальшої обробки необхідна для якості надрукованої деталі [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З 2003 року спостерігається значне зростання продажу 3D-принтерів. Крім того, вартість їх вартість суттєво знизилася та розширилася область застосування.

Принцип роботи 3D-принтера залежить від того, яка технологія в ньому реалізована: FDM, SLS, SLA, LOM, SGC, PolyJet, DODJet або Binding powder by adhesives. Найпопулярнішою є технологія FDM-друку. Принтер з технологією FDM-друку використовує для роботи тонкі полімерні нитки діаметром 1,75 мм. Такі нитки найчастіше виготовляються з пластика PLA або ABS.

3D-принтер – пристрій, що використовує метод створення фізичного об'єкта на основі віртуальної 3D-моделі. Процес друку починається з моделювання виробу в графічних програмних середовищах, що дозволяють створювати 3D-моделі. Прикладом може бути програмний продукт Solid Works. Створена цифрова версія в програмі для 3D-моделювання завантажується в спеціальну програму для генерування G-коду, яка ділить об'єкт на тонкі горизонтальні шари і формує ланцюг команд, зрозумілих принтеру. Готовий об'єкт відправляється на друк.

3D-принтер формує фізичні об'єкти пошарово, видавлюючи на робочу платформу тонку цівку розплавленого матеріалу. Принтер переміщує екструдер в точній відповідності з цифровою моделлю, тому надрукований фізичний об'єкт повністю відповідає своєму віртуальному прообразу. Екструдер принтера, з якого видавлюється м'який пластик, переміщається під час роботи над нерухомою робочою платформою.

Процес друку починається з нижнього шару, після чого принтер наносить наступний шар поверх першого. Розплавлений пластик, потрапляючи в робочу зону, дуже швидко охолоджується і твердне.

Щоб об'єкт не деформувався під час друку, 3D-принтер друкує підтримуючі конструкції. Вони друкуються не завжди, а лише в тому випадку, якщо в конструкції об'єкта є порожнечі або нависають деталі. Після закінчення друку структури підтримки можна легко видалити вручну або зрізати гострим лезом або ножем.

В багатьох галузях народного господарства практичне використання 3D-друку вже не викликає сумнівів. Прикладом застосування може бути: медицина, машинобудування, радіотехніка та електроніка, архітектура, автомобілебудування тощо. За допомогою 3D-принтерів можна надрукувати меблі, музичні інструменти, засоби пересування, продукти харчування, будинки і навіть живі людські органи і тканини тощо.

Проаналізувавши застосування 3D-принтерів в різних галузях промисловості можна зробити висновок, що найбільший потенціал 3D-принтери мають у виробництві промислових виробів. Тому 3D-друк має перспективи застосування і у легкій промисловості.

Деякі існуючі витратні матеріали для 3D-друку цілком придатні для виготовлення одягу, білизни та їх елементів. Але їх асортимент постійно поповнюється. З'являються матеріали з необхідними технічними параметрами.

3D-принтери з технологією 3D-друку поступово освоюють сферу виробництва одягу, і в першу чергу, виробництво моделей для високої моди. На подіумах світу з'являються колекції одягу відомих модельєрів, які свої моделі створили за допомогою 3D-друку, або інтегрували в одяг функціональні 3D-друковані компоненти.

Також технологія 3D-друку дозволяє використовувати для виготовлення одного предмета одягу кілька різних матеріалів. Такий підхід дозволяє вирішити проблеми, пов'язані з міцністю і еластичністю речей, що виготовляються.

3D-технології при виробництві взуття – в останній час новини рябіють подібними заголовками, причому фігурують в них такі відомі всьому світу бренди, як Nike, Adidas, Reebok.

Фірма «Adidas» запустила виробництво кросівок з надрукованою на 3D-принтері підошвою. Крім цього вона планує використовувати 3D-принтер для виробництва нових моделей кросівок, що може привести до зростання попиту на цей тип пристроїв зі сторони легкої промисловості.

Компанія «Reebok» планує у 2017 році відкрити нову фабрику в Лінкольні (США), де буде виробляти окремі деталі взуття за допомогою 3D-друку. Про це йдеться в повідомленні компанії. Розроблена «Reebok» методика передбачає створення заздалегідь запрограмованого дизайну шар за шаром за допомогою розробленого концерном «BASF» матеріалу. 3D-друк дозволить знизити собівартість виробництва, оскільки підошва взуття буде друкуватися без використання прес-форми. 3D-друк відкриває абсолютно нові можливості для того, що можна створити і з якою швидкістю [2].

Існує багато і інших прикладів застосування 3D-принтерів при виготовленні компонентів для одягу і взуття.

Перспективи для застосування

Розглянемо можливості застосування 3D-друку в легкій промисловості в майбутньому.

Застосування 3D-друку при виробництві одягу. Розглянемо можливі напрямки застосування 3D-друку в швейній промисловості.

1. Друк пластикової фурнітури і аксесуарів для виготовлення одягу. Дизайнери одягу розробляють трьохмірні моделі нових видів пластикової фурнітури, або аксесуарів, виготовляють за допомогою 3D-друку зразки, тестують їх, змінюють, що необхідно і цикл повторюється. Як тільки дизайнер одягу знаходить потрібну форму фурнітури, він відправляє її на виробництво.

2. Швидке виготовлення полімерної фурнітури чи аксесуару для одягу, що експлуатується при їх поломці чи втраті по прототипу існуючої. З часом можна оснастити швейні ательє 3D-принтерами, що пришвидшить ремонт одягу.

3. Створення одягу за індивідуальними параметрами замовника. Саме за допомогою 3D-сканування, алгоритмічного моделювання і 3D-друку кожна людина зможе замовити в магазині річ, що ідеально підходить її анатомічним особливостям. Дана адитивна технологія дасть можливість значно скоротити і автоматизувати сам виробничий цикл, а це в свою чергу приведене до економії часу та зменшення кількості працівників і кількість відходів.

Застосування 3D-друку при виробництві взуття. Розглянемо можливі напрямки застосування 3D-друку у взуттєвій промисловості.

1. Використання 3D-друку може здійснюватися безпосередньо в виробничому процесі. Дизайнери взуття розробляють трьохмірні моделі нових колодок, виготовляють за допомогою 3D-друку зразки, тестують їх, змінюють, що необхідно і цикл повторюється. Як тільки дизайнер взуття знаходить потрібну форму, він відправляє її на виробництво, де безпосередньо по цій моделі будують виробничу лінійку і передають у масове виробництво.

2. Друк пластикової фурнітури і аксесуарів для виготовлення взуття. Технологія виготовлення може бути аналогічною до технології виготовлення пластикової фурнітури і аксесуарів для одягу, описаної вище.

3. На сьогоднішній час виробництво взуття здійснюється стандартизовано через стандартну систему розмірів. Але проблема полягає в тому, що не має двох однакових ніг, навіть наші власні ноги не однакові. Самі передові кросівки від відомих світових брендів не вирішують проблему належної посадки і вирівнювання тіла від кісточок до колін, стегон і спини. Це значно збільшує риск травм і хронічної м'язової і суглобної втоми. Тому використання 3D-сканування, алгоритмічного моделювання і 3D-друку при виготовленні взуття за заданими характеристиками, наприклад за необхідними характеристиками (по амортизації і відкату) для спортсменів легкоатлетів може вирішити дану проблему. Надруковані кросівки зможуть мати кращі характеристики в порівнянні з заявленими параметрами [3].

Сучасний одяг та взуття мають абсолютно негативний вплив на навколишнє середовище, оскільки їх велика кількість викидається щорічно на смітник (не утилізується), і це не говорячи ще про відходи швейних та взуттєвих підприємств. Використання в одязі та взутті, виготовлених методом 3D-друку біологічних витратних полімерів, що розкладаються через певний період часу, дозволить вирішити дану проблему. Також цю проблему частково може вирішити розробка 3D-принтерів, що використовуватимуть в якості витратних матеріалів при виготовленні виробів полімерні відходи швейних та взуттєвих підприємств.

Застосування 3D-друку в галузевому машинобудуванні. Розглянемо можливі напрямки застосування 3D-друку в обладнанні легкої промисловості.

1. Розробка та впровадження нових виробничих технологій та обладнання є важливим завданням для галузевого машинобудування в умовах стрімкої зростаючої конкуренції. Тому виникає необхідність в оперативному створенні та оцінці прототипів нової продукції. Для швидкого прототипування, тобто швидкого виготовлення прототипів моделей і об'єктів для подальшої доробки. В деяких випадках вже на етапі проектування потрібно кардинальним чином змінити конструкцію вузла або об'єкта в цілому. В інженерії такий підхід здатний істотно знизити витрати у виробництві при освоєнні нової продукції. Для швидкого виготовлення окремих вузлів або деталей з різних матеріалів можна здійснити за допомогою 3D-друку. Це рішення економічно найбільш вигідно для дрібносерійного виробництва. Створення прототипів з частково або повністю прозорою структурою дає можливість оцінити роботу механізму «зсередини» і використовувати при доопрацюванні технологій і виробів [4].

Із застосуванням даної адитивної технології з'являється можливість створити необхідний прототип в найкоротші терміни. Важливим є те, що із отриманим прототипом можна провести необхідне тестування, перевірити його на відповідність усім параметрам і тим самим значно здешевити виробництво і уникнути можливих проблем в подальшому.

2. В існуючому обладнанні швейної та взуттєвої промисловості, наприклад в швейних машинах, використовується багато деталей виготовлених із полімерних матеріалів, наприклад шестерень, втулок, осей тощо. В процесі експлуатації вони можуть зламатися, зноситися, що приведе до поломки машини, або неякісного виконання технологічного процесу. У такому випадку 3D-принтер є ідеальним рішенням для того, щоб їх виготовити в одиничних екземплярах, коли придбання нових не можливе, або веде до великих витрат. 3D-принтер може легко надрукувати більшість з них. Для цього необхідно лише відсканувати дану деталь за допомогою 3D-сканера для створення копії деталі та підібрати пластик з необхідними властивостями. З часом можна оснастити сервісні центри з ремонту швейного устаткування та магазини з їх продажу 3D-принтерами, що пришвидшить ремонт даного обладнання.

3. Швидке створення за допомогою 3D-друку прес-форм для термопласт-автоматів із виготовлення деталей галузевого машинобудування. Виготовлення неметалевих прес-форм для лиття під тиском для термопласт-автоматів забезпечує ряд переваг. Актуальним це питання може бути і для литтєвих машин взуттєвого виробництва.

Можуть існувати і інші напрямки застосування 3D-принтерів при виготовленні одягу і взуття.

Висновки

Застосування технології 3D-друку в легкій промисловості – це величезний стрибок вперед, здатний вирішити низку проблем у легкій промисловості та підняти її на якісно новий рівень. Не залишається сумніві, що впровадження даної технології для масового виробництва одягу і взуття є лише питанням часу. Тому всі наукові дослідження та розробки, що будуть проведенні та здійсненні в цьому напрямку є актуальними, матимуть елементи наукової новизни, а отримані результати та устаткування матимуть практичне застосування.

Література

1. Технічна творчість. Сучасні технології в механіці / укл. : Скиба М.Є., Поліщук О.С., Онофрійчук В.І. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – 214 с.

2. Reebok налагодить друк кросівок на 3D-принтері [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.rbc.ua/ukr/lnews/reebok-naladit-pechat-krossovok-3d-printere-1478088427.html.

3. Принтер для печати обуви [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://3dmag.org/ru/blog/3d-printing/869.html

4. Сучасні технології тривимірного друку в машинобудуванні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://pmoapv.pp.ua/index.php?r=conference%2Fconference-article%2Fview&id=10.

References

1. Tekhnichna tvorchist. Suchasni tekhnolohii v mekhanitsi / ukl. : Skyba M.Ye., Polishchuk O.S., Onofriichuk V.I. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – 214 s.

2. Reebok nalahodyt druk krosivok na 3D-prynteri [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.rbc.ua/ukr/lnews/reebok-naladit-pechat-krossovok-3d-printere-1478088427.html.

3. Prynter dlia pechaty obuvy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://3dmag.org/ru/blog/3d-printing/869.html

4. Suchasni tekhnolohii tryvymirnoho druku v mashynobuduvanni [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://pmoapv.pp.ua/index.php?r=conference%2Fconference-article%2Fview&id=10.

Рецензія/Peer review : 23.06.2017 р. Надрукована/Printed :12.09.2017 р.
Рецензент: к.т.н., проф.Кармаліта А.К.

УДК 677.025

Н.М. ЛИТВИНЕНКО
Київський національний університет культури і мистецтв

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ ТРИКОТАЖУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ОДЯГУ ДЛЯ ВАГІТНИХ З ПІДТРИМУЮЧИМ ЕФЕКТОМ

В статті проведено дослідження релаксаційних властивостей та повітропроникності еластичної бандажної стрічки для виготовлення функціонального одягу для вагітних з підтримуючим ефектом. В результаті досліджень визначено, що вироблена на уточно-в'язальній машині еластична бандажна стрічка є більш оптимальною під час виготовлення функціонального одягу для вагітної жінки зі вставною еластичною стрічкою.

Ключові слова: бандаж, еластична бандажна стрічка, деформаційні характеристики, повітропроникність, під'юбник, функціональний одяг для вагітних.

N.M. LYTVYNENKO
Kyiv National University of Culture and Arts

RESEARCH OF RELAXATION PROPERTIES AND VENTILENESS OF THE KNITTED FABRIC FOR MAKING OF FUNCTIONAL CLOTHES FOR PREGNANT WITH SUPPORTING EFFECT

The primary objective of this work is development of functional clothes for pregnant with a supporting effect due to an insertion from the elastic knitted fabric or elastic ribbon which carries out a supporting effect. In accordance with the put purpose the following task decided in the article: deformation properties and ventileness of elastic ribbon were experimentally probed, namely the double elastic osnovov'yazanogo knitted fabric for bracer wares. Investigational two standards of elastic ribbons of mine-out are on different machines the utochnim interlacings from one type of raw material. Experimental researches of relaxation properties of elastic ribbon are conducted at the small loading and middle loading. Such experimental researches were executed in an order to probe, as tensility and deformation properties of good changes in II-mu and III-mu trimester of pregnancy. Research of ventileness consists in measuring of volume of air which prokhodit' through the set plane of proof-of-concept material for time unit at the certain discharging under a point test. As a result of the research, it has been determined that the elastic bandage band made on an intake knitting machine is more optimal for the production of functional clothing for a pregnant woman with an inserted elastic tape.

Keywords: bandage, elastic bandage, deformation characteristics, air permeability, footwear, functional clothes for pregnant women.

Постановка проблеми

За даними акушерів-гінекологів, останнім часом зросла кількість складних вагітностей, збільшилася статистика самовільного переривання вагітності [1]. Тому жінкам при складному перебігу вагітності та для профілактики утворення розтяжок, перерозподілу навантаження на хребет призначають носіння допологового бандажа.

Більшість жінок усвідомлюють необхідність носіння бандажа в дородовий період, але через фізіологічний та психологічний дискомфорт, а також неестетичний вигляд бандажів деякі з пацієнток не виконують приписи медиків. Додатковий шар в одязі погіршує їх гігієнічні показники, а серійне виробництво бандажів не дозволяє враховувати індивідуальні особливості фігур вагітних жінок. Виробники різних країн використовують відмінні один від одного антропометричні стандарти, шкали розмірів, міжрозмірні інтервали байдужості, що також ускладнює вибір комфортного та відповідного розміру для фігури жінки бандажа [2].

На теперішній час актуальним є проектування ергономічного психологічно комфортного побутового одягу з функцією допологового та післяпологового бандажа. Принцип проектування полягає у встановленні деталей бандажного виробу в побутовий повсякденний одяг.

Матеріали для виробництва одягу з функцією допологового та післяпологового бандажа, а саме для еластичних бандажних виробів повинні відповідати не тільки вимогам стандарту, але і забезпечувати комфортний стан жінки в період вагітності і відповідати гігієнічним вимогам, що пред'являються до одягу для вагітних. Оскільки бандажний виріб повинен щільно прилягати до тіла людини на певних ділянках, то до матеріалів пред'являються підвищені гігієнічні вимоги, що визначаються санітарними нормами до білизняних виробів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз конструкцій дородових бандажів показав, що, як правило, всі вони виготовлені з еластичних матеріалів, що мають на певних ділянках різну поверхневу щільність, жорсткість і формостійкість. Для забезпечення антропологічної відповідності та здійснення медико-профілактичної функції в бандажі еластична стрічка повинна розташовуватися спереду в нижній частині живота, а ззаду на рівні попереку. Деталі виробу з більш високою поверхневою щільністю розташовані в області попереку і нижній частині живота жінки. Саме такий розподіл зон поверхневої густини бандажа дозволяє йому зняти навантаження з попереку, регулювати центр ваги і полегшує майбутній мамі «носіння» власного живота [2]. Натяг і ширина бандажної стрічки повинні бути достатніми для забезпечення ефективної підтримки, але не надмірними, щоб не викликати труднощі кровообігу [3].

Якісна сировина дає компресійному трикотажу його основні споживчі властивості: міцність,

тривале збереження лікувальних або профілактичних властивостей, гарантоване збереження компресії. Що стосується матеріалів для виготовлення бандажів для вагітних то, звичайно ж, чим більше в складі виробу бавовни, тим краще. Адже бандаж з натуральних видів сировини є більш комфортним, гіпоалергенним, екологічним, добре пропускає повітря. Однак, враховуючи особливість бандажних виробів (пружність, еластичність для кращого утягування, підтримки, фіксації), чисто бавовняними вони бути не можуть. Тому в сучасних моделях бандажів, поряд з натуральними матеріалами (бавовною і віскозою), використовуються і високотехнологічні штучні волокна – поліамід (ПАМ), мікрофібра, Meryl, Tactel, поліестер, еластан, лайкра. Завдяки ним вироби стають міцними, добре розтягуються, тут же приймають початковий стан, покращують зовнішній вигляд і полегшують догляд: бандажі добре переносять часте прання, не деформуються після нього і швидко сохнуть, деякі можна навіть не прасувати [2].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

У процесі використання матеріалів для бандажних виробів найбільш важливими вважаються ергономічні властивості, які визначаються фізіологічними, гігієнічними та іншими групами показників якості матеріалів. Особливо важливою властивістю матеріалів для виробництва бандажних виробів є нешкідливість матеріалів. У складі матеріалів повинно міститися не менше 90% натуральних (бавовна) або близьких по гігієнічним показникам волокон (віскоза, мікрофібра). Для забезпечення достатньої розтяжності й еластичності допускається до 10% синтетичних волокон (еластан, лайкра) [2].

Для створення мікроклімату для тіла вагітної жінки важливий показник повітропроникності, який залежить від властивостей волокон і складових їх ниток, в великій мірі залежить від пористості, кількості та величини відкритих пор, а також від товщини полотна.

Мета статті

Головною метою цієї роботи є розробка функціонального одягу для вагітних з підтримуючим ефектом за рахунок вставки із еластичного трикотажу чи еластичної стрічки, яка здійснює підтримуючий ефект.

Відповідно до поставленої мети в статті вирішувалося наступне завдання: експериментально досліджувались деформаційні властивості та повітропроникність еластичної стрічки, а саме подвійного еластичного основов'язаного трикотажу для бандажних виробів.

Виклад основного матеріалу

При розробці функціонального одягу для вагітних з підтримуючим ефектом – під'юбника, вирішено використати еластичний основов'язаний трикотаж, що створюватиме підтримуючий ефект. При виробленні еластичного основов'язаного трикотажу використовують уточні переплетення та переплетення ланцюжок. Переплетення ланцюжок утримує в структурі трикотажу еластомерні нитки, що надають трикотажу високі пружні властивості та еластичність.

Трикотажні вироби при експлуатації мають властивість пристосовуватися до навантаження зміщуючи елементи макроструктури, що і забезпечує комфортність трикотажних виробів. Разом з тим, значна зміна структури може ускладнити відновлення виробу при релаксації. Тому важливим є визначення розтяжності полотен і їх можливість відновлювати свої лінійні розміри після зняття навантаження.

Досліджено два зразки еластичних стрічок вироблених на різних машинах уточним переплетенням з одного виду сировини, але з різною кількістю еластомерних ниток в структурі трикотажу при ширині виробу 50 мм:

І-й зразок – виготовлений на уточно-в'язальній машині; переплетення – уток-ланцюжок; сировина – нитка поліефірна текстурована (18 текс), нитка латексна(358 текс); 34 еластомерні нитки при ширині зразка 50 мм; діаметр еластомерної нитки – 0,67 мм;

ІІ-й зразок – виготовлений на основов'язальній рашель машині; переплетення – уток-уток-уток-ланцюжок; сировина – нитка поліефірна текстурована (18 текс), нитка латексна (358 текс); 56 еластомерних ниток при ширині зразка 50 мм; діаметр еластомерної нитки – 0,67мм.

Проведено експериментальні дослідження релаксаційних властивостей еластичної стрічки при малому навантаженні (7,8Н) та середньому навантаженні (51Н та 84Н) зразків І та ІІ відповідно [4]. Такі експериментальні дослідження були виконані для того, щоб дослідити, як змінюється розтяжність та деформаційні властивості виробу в ІІ-му та ІІІ-му триместрі вагітності [5].

Експериментальні дослідження дискретних релаксаційних характеристик еластичної стрічки, виробленої на уточно-в'язальній машині з латексних та поліефірних текстурованих ниток (зразок І), зазначені в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Показники дискретних релаксаційних характеристик при малому експлуатаційному навантаженні

№	Повна деформація ε,%	Складові частини деформації, %			Частки складових частин деформації		
		ε_1	ε_2	ε_3	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\Delta\varepsilon_3$
1	27	20	3	4	0,7	0,11	0,15
2	28	15	9	4	0,54	0,32	0,14
3	27	19	5	3	0,67	0,19	0,11
4	27	16	8	3	0,59	0,3	0,11
5	24	16	6	2	0,71	0,25	0,08

На основі даних таблиці 1 побудовані гістограми часток складових частин деформації зразків трикотажних полотен, що показано на рис. 1.

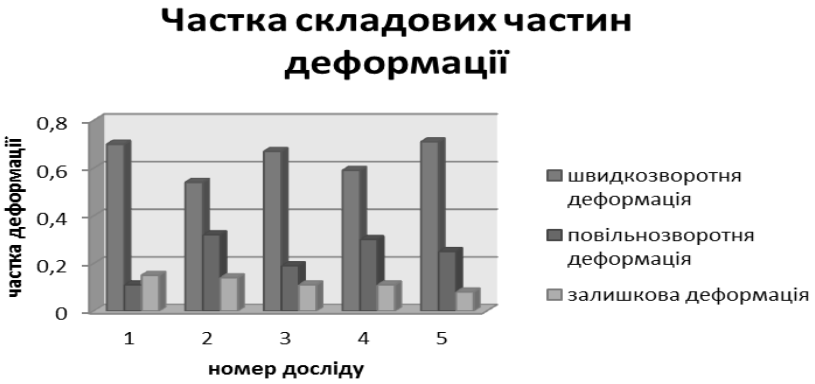


Рис. 1. Показники частки складових частин деформації зразків еластичного бандажної стрічки при малому експлуатаційному навантаженні

Таблиця 2

Показники дискретних релаксаційних характеристик при середньому експлуатаційному навантаженні

№	Повна деформація ε,%	Складові частини деформації, %			Частки складових частин деформації		
		ε_1	ε_2	ε_3	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\Delta\varepsilon_3$
1	105	92	8	5	0,86	0,08	0,06
2	109	88	16	5	0,81	0,15	0,06
3	113	96	12	5	0,84	0,11	0,05
4	104	89	12	3	0,87	0,12	0,03
5	108	89	15	4	0,81	0,14	0,04

На основі даних таблиці 2 побудовані гістограми часток складових частин деформації зразків трикотажних полотен, що показано на рис. 2.

Рис. 2. Показники частки складових частин деформації зразків еластичного бандажної стрічки при середньому експлуатаційному навантаженні

Як видно, еластична стрічка зразка I володіє дуже доброю еластичністю, адже частка швидко зворотної деформації при малому навантаженні становить від 15% до 20%, а при середньому – від 88% до 96 %, що забезпечує повернення в умовно-рівноважний стан після експлуатаційних навантажень, та невелика залишкова деформація, що становить від 2% до 4% при малому навантаженні, а при середньому – від 3% до 5%. Звідси можна зробити висновок, що при збільшенні навантаження, по мірі росту живота в період вагітності, розтяжність еластичної стрічки буде збільшуватися, звідси і пружні властивості трикотажу. Також слід відмітити, що склад сировини, бандажної стрічки, тобто кількість еластомерних ниток, теж відіграє важливу роль у релаксаційних характеристиках виробу.

Результати експериментального дослідження дискретних релаксаційних характеристик еластичної стрічки, виробленої на основов'язальній рашель машині з латексних та поліефірних текстурованих ниток (зразок II), зазначені в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3

Показники дискретних релаксаційних характеристик при малому експлуатаційному навантаженні

№	Повна деформація ε,%	Складові частини деформації, %			Частки складових частин деформації		
		ε_1	ε_2	ε_3	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\Delta\varepsilon_3$
1	24	17	5	2	0,71	0,21	0,08
2	26	16	6	4	0,62	0,23	0,15
3	24	16	5	3	0,67	0,21	0,13
4	26	16	6	4	0,62	0,23	0,15
5	25	16	6	4	0,64	0,24	0,16

На основі даних таблиці 3 побудовані гістограми часток складових частин деформації зразків трикотажних полотен, що показано на рис. 3.

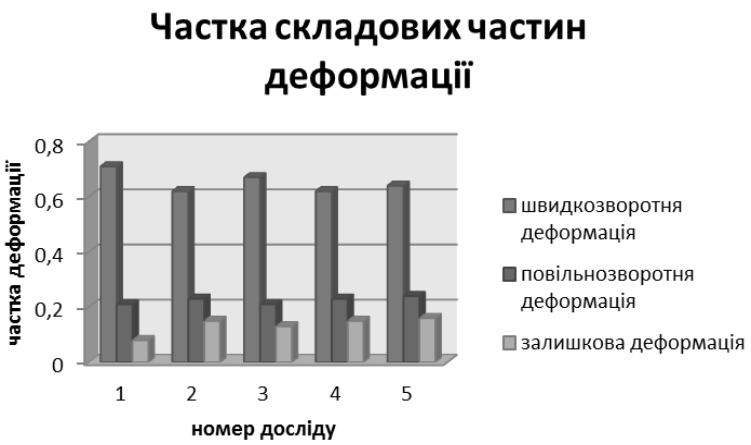


Рис. 3. Показники частки складових частин деформації зразків еластичного бандажної стрічки при малому експлуатаційному навантаженні

Таблиця 4

Показники дискретних релаксаційних характеристик при середньому експлуатаційному навантаженні

№	Повна деформація ε,%	Складові частини деформації, %			Частки складових частин деформації		
		ε_1	ε_2	ε_3	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\Delta\varepsilon_3$
1	109	92	13	4	0,85	0,12	0,04
2	115	96	14	5	0,84	0,12	0,05
3	113	95	14	4	0,84	0,12	0,04
4	113	94	16	3	0,83	0,14	0,03
5	113	96	13	4	0,86	0,11	0,04

На основі даних таблиці 4 побудовані гістограми часток складових частин деформації зразків трикотажних полотен, що показано на рис. 4.

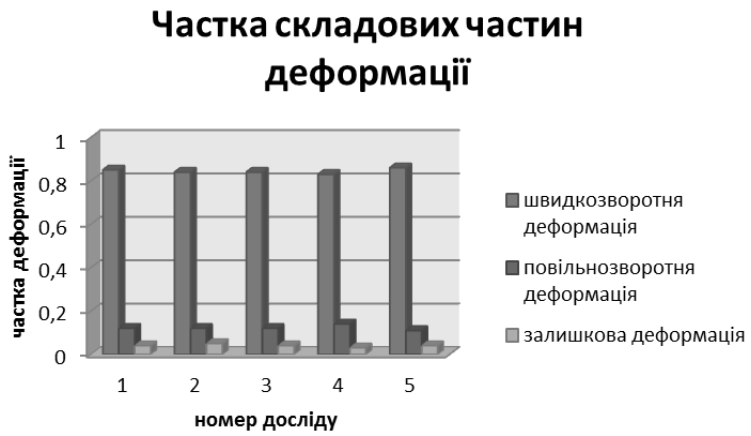


Рис. 4. Показники частки складових частин деформації зразків еластичного бандажної стрічки при середньому експлуатаційному навантаженні

Як видно з гістограм, стрічки зразка ІІ володіють також доброю еластичністю, частка швидко зворотної деформації при малому навантаженні становить від 16% до 17%,а при середньому – від 92% до 96%, що забезпечує повернення в умовно-рівноважний стан після експлуатаційних навантажень, та залишкова деформація, що становить від 2% до 4% при малому навантаженні, а при середньому – від 3% до 5%.

Як видно з наданих таблиць, показники швидко зворотної та залишкової деформації зразка І та зразка ІІ мають майже рівні між собою. Але швидко зворотна деформація зразка І є більшою при прикладанні малого навантаження до зразка в порівнянні зі зразком ІІ на 3%. Тому після дослідження двох зразків еластичних бандажних стрічок, можна зробити висновок, що релаксаційні показники зразка І є більш оптимальними, бо розтяжність еластичної стрічки – один з найголовніших факторів для конструкції виробу з підтримуючим ефектом, так як розтяжність повинна збільшуватись по мірі росту живота вагітної, не спричиняючи дискомфорт під час вагітності.

Дослідження повітропроникності експериментального зразка подвійного еластичного основов'язаного трикотажу виконано згідно з діючим стандартом [25]. Сутність методу визначення повітропроникності, полягає в вимірі об'єму повітря, що проходить крізь задану площину випробувального матеріалу за одиницю часу при визначеному розрядженні під точковою пробою.

При проведенні випробування використовувався прилад марки ATL – 2(FF – 12), що забезпечив: вимірювання повітропроникності в діапазоні від 2,5 до 10750 дм3/м2с; розрядження під точковою пробою 49Па (5 мм вод. ст.); силу стискання точкової проби 147 Н (кгс).

Результати досліджень експериментальних зразків на повітропроникність представлені в таблицях 5, 6.

Таблиця 5

Значення повітропроникності зразка І бандажної еластичної стрічки виробленої на уточно-в'язальній машині

№ п/п	Кількість повітря V, л/год					Vсер	Q^{max}_{min}
1	350	355	350	350	355	352	9,8
2	410	405	405	410	407	407	11,3
3	370	375	375	373	370	373	10,4
4	450	445	450	448	445	448	12,4
5	435	430	438	430	435	434	12,1

Таблиця 6

Значення повітропроникності зразка ІІ бандажної еластичної стрічки виробленої на основов'язальній рашель машині

№ п/п	Кількість повітря V, л/год					Vсер	Q^{max}_{min}
1	250	255	255	250	255	253	7,1
2	275	280	278	280	280	279	7,8
3	350	345	448	345	345	367	10,2
4	300	305	310	305	307	305	8,5
5	360	355	355	360	360	358	9,9

Встановлено, що повітропроникність еластичної стрічки виробленої з латексних та поліефірних текстурованих ниток на основов'язальній рашель машині більш низька (в середньому Q^{max}_{min}=8,7) в порівнянні із еластичною стрічкою виробленої з латексних та поліефірних текстурованих на уточно-в'язальній машині (в середньому Q^{max}_{min} =11,2), що обумовлено більшою заповненістю петельної структури трикотажу та більшою поверхневою щільністю зразків.

Висновки

Проведено експериментальні дослідження деформаційних характеристик при малому навантаженні (7,8Н) та середньому навантаженні (51Н та 84Н), та повітропроникності двох зразків еластичних стрічок вироблених на різних машинах: зразок І – вироблений на уточно-в'язальній машині та зразок ІІ– вироблений на основов'язальній рашель машині. Такі експериментальні дослідження були виконані для того, щоб дослідити, як змінюється розтяжність та деформаційні властивості виробу на ІІ-му та ІІІ-му триместрі вагітності.

Визначено, що зразок з уточно-в'язальної машини є більш оптимальним для виготовлення конструкції виробу з підтримуючим ефектом для вагітних жінок. Так як показники швидко зворотної деформації при малому навантаженні становлять від 15 до 20%, а при середньому – від 88% до 96%, що забезпечує повернення в умовно-рівноважний стан після експлуатаційних навантажень, а залишкова деформація - становить від 2% до 4% при малому навантаженні, а при середньому – від 3% до 5%. Проте швидко зворотна деформація зразка ІІ при малому навантаженні становить від 16% до 17%, а при середньому – від 92% до 96%, а залишкова деформація - становить від 2% до 4% при малому навантаженні, при середньому – від 3% до 5%.

Встановлено, що повітропроникність еластичної стрічки виробленої з латексних та поліефірних текстурованих ниток на уточно-в'язальній машині більш оптимальна для виготовлення під'юбника для вагітної жінки зі вставною еластичною стрічкою, ніж повітропроникність стрічки виробленої з латексних та поліефірних текстурованих ниток на основов'язальній рашель машині, що обумовлено різною кількістю еластомерних ниток та різною щільністю зразків трикотажу. Еластична стрічка, що вироблена на уточно-в'язальній машині має 34 еластомерні нитки при ширині зразка 50 мм, а еластична стрічка, що вироблена на основов'язальній рашель машині – 56 еластомерних ниток при ширині зразка 50 мм.

Література

1. Тихомиров привычного невынашивания беременности [Електронний ресурс] // Фармацевтический вестник. – 2006. – № 1. – Режим доступу : https://cyberleninka.ru/.../analiz-svoystv-materialov-lechebno-profilakticheskoy-byto.

2. Анализ свойств материалов лечебно-профилактической бытовой одежды для беременных [Електронний ресурс] / А. А. Бикбулатова. – Режим доступу : http://pandia.ru/text/77/458/1704.php.

3. Компания ТИСА-Киев [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.tisa-kiev.com/company/index.html.

4. ГОСТ 16218.9 – 89. Изделия текстильно-галантерейные. Методы испытаний при растяжении.

5. Вагітність як привід бути красивою [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://megasite.in.ua/94770-vagitnist-yak-privid-buti-krasivoyu.html.

References

1. Tykhomyrov pryvychnoho nevynashyvanyia beremennosty [Elektronnyi resurs] // Farmatsevtycheskyi vestnyk. – 2006. – # 1. – Rezhym dostupu : https://cyberleninka.ru/.../analiz-svoystv-materialov-lechebno-profilakticheskoy-byto.

2. Analyz svoistv materyalov lechebno-profylaktycheskoi bytovoi odezhdy dlia beremennykh [Elektronnyi resurs] / A. A. Bykbulatova. – Rezhym dostupu : http://pandia.ru/text/77/458/1704.php.

3. Kompanyia TYSA-Kyev [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.tisa-kiev.com/company/index.html.

4. HOST 16218.9 – 89. Yzdelyia tekstylno-halantereinye. Metody yspytanyi pry rastiazhenyy.

5. Vahitnist yak pryvid buty krasyvoiu [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://megasite.in.ua/94770-vagitnist-yak-privid-buti-krasivoyu.html.

Рецензія/Peer review : 31.08.2017 р. Надрукована/Printed :09.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Галавська Л.Є.

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.12

Л.В. КАРПОВА, В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Н.М. САМАРУК
Хмельницький національний університет

МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦІЛІ ПО ФУР'Є-ОБРАЗУ ВІДБИТОГО СИГНАЛУ

В статті представлено теоретичний аналіз і числове моделювання деяких можливих алгоритмів вимірювання спектральних характеристик відбитого сигналу і оцінки помилок таких вимірів, а також визначення порогового відношення сигнал/шум, що дозволяє застосувати адаптивну процедуру моноімпульсної радіолокації. Проаналізовано можливості розрахункового методу визначення спектра, визначення максимумів спектральної щільності по наближенню сигналу кінцевим рядом. Викладено принцип адаптації спектру виявленого сигналу і оцінено збільшення точності оцінки параметрів цілей при використанні адаптивної процедури моноімпульсної радіолокації. Досліджено чисельні алгоритми, що реалізують відповідні вимірювання, а також апаратні схеми, що суттєво спрощують практичну реалізацію вимірювальних установок.

Ключові слова: спектр, сигнал, співвідношення сигнал/шум, спектральна щільність, моноімпульсна радіолокація.

L.V. KARPOVA, V.I. LUZHANSKIY, N.M. SAMARUK
Khmelnytsky National University

MATHEMATICAL METHOD OF DETERMINATION OF TARGET SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE FOURIER-IMAGE OF REFLECTED SIGNAL

The article presents a theoretical analysis and numerical modelling of some possible algorithms for measuring the spectral characteristics of the reflected signal and estimating the errors of such measurements, as well as determining the threshold signal-to-noise ratio, which allows to apply the adaptive procedure of monopulse radar. The possibilities of the calculated method for determining the spectrum and the determination of the spectral density maxima for the signal approximation by the finite series are analyzed. The principle of adaptation of the spectrum of the detected signal is presented and the increase in the accuracy of the estimation of target parameters using an adaptive procedure of monopulse radar is estimated. The article investigates the numerical algorithms, which implement the corresponding measurements, as well as the hardware schemes, and considerably simplify the practical realization of the measuring installations.

Key words: spectrum, signal, signal / noise ratio, spectral density, monopulse radar.

Вступ. Експериментальна реалізація надширокосмугових електромагнітних імпульсів відкриває нові можливості для підвищення точності визначення параметрів цілі і покращення її характеристик супроводу при моноімпульсній радіолокації об’єктів. Ширина спектра виявленого імпульсу в даному випадку настільки велика [1–3], що для різних частот падаючого випромінювання коефіцієнт відбитої цілі (величина ефективної відбиваючої поверхні) може мати відчутні відмінності. В цьому випадку приведення діапазону частот виявленого імпульсу у відповідність з діапазоном максимальних значень ефективної відбиваючої цілі може дати суттєву перевагу в точності оцінки динамічних параметрів виявленого об'єкту.

Методи генерації потужних наносекундних електромагнітних імпульсів допускають оперативну перебудову параметрів випромінюваних сигналів і, зокрема, зміну спектру випромінювання, в тому числі за рахунок використання блочно-модульного способу побудови випромінювальної системи. Процедура адаптації параметрів виявленого імпульсу в даному випадку може бути побудована за наступним принципом.

На першому етапі адаптивної процедури проводиться опромінення простору потужнім надширокосмуговим електромагнітним імпульсом і по відбитому сигналу приймається рішення про виявлення цілі. Одночасно проводиться спектральний аналіз зондуючого імпульсу, і результати $S_0(\omega)$ записуються в блок зберігання інформації. При позитивному рішенні про виявлення проводиться аналіз спектра відбитого сигналу $S(\omega)$. Для знаходження максимуму в спектральній характеристиці відбитої цілі $\sigma(\omega)$ в обчислювальній системі утворюється відношення $\sigma(\omega) = |S(\omega)/S_0(\omega)|$ і проводиться аналіз максимумів цієї величини. Якщо один або кілька максимумів виявляються вищими за середнє значення ефективної відбиваючої поверхні, то проводиться підстроювання спектра випромінюваного імпульсу так, щоб максимальні компоненти спектра виявленого імпульсу припадали на максимальне значення ефективної спектральної відбитої поверхні. При цьому ширина спектра випромінюваного імпульсу також повинна узгоджуватися з залежністю $\sigma(\omega)$, щоб енергія відбитого сигналу приймала максимально можливе значення.

Конкретні закони зміни спектра випромінюваного імпульсу в залежності від вимірювальної величини $\sigma(\omega)$ повинні бути розроблені для конкретних експериментальних параметрів генеруючої системи, зокрема, числа незалежних каналів випромінювання, частотного перекриття діапазону генерації, можливих характеристик передбачуваних цілей, величини можливого звуження спектра імпульсу генерації близько несучої частоти і т.п. Відзначимо, що при наявності помилок визначення спектральних амплітуд ефективної відбиваючої цілі адаптацію слід проводити, коли різниця максимального значення $\sigma(\omega)$ і середнього значення стане більше помилки визначення спектральних компонентів $\sigma(\omega)$.

У процесі супроводу цілі можливі повільні зміни спектральної характеристики ефективної відбиваючої поверхні, викликані, наприклад, поворотом цілі і т.п. В цьому випадку для збереження високої точності визначення динамічних параметрів цілі необхідно періодично проводити корекцію спектра виявленого імпульсу, що буде складатися в повторному вимірюванні спектра відбитого сигналу, у визначенні $\sigma(\omega)$ та зміні відповідно до цієї нової залежністю спектральних характеристик випромінювального імпульсу.

Точність визначення параметрів цілі при адаптивній процедурі радіолокації. Оцінимо збільшення точності визначення параметрів цілі при використанні адаптивної процедури радіолокації. Через наявність геометричних неоднорідностей профілю об'єкта і частотної дисперсії в матеріалі покриття ефективна площа розсіювання цілі може відрізнятися на різних частотах в декілька разів. Нехай, наприклад, максимальне значення $\sigma(\omega)$, досягається в районі частоти ω^* і більше середнього по спектру значення ефективної відбитої поверхні цілі σ_{av} і η раз:

$$\sigma(\omega^*) = \eta\sigma_{av}. \tag{1}$$

Нехай весь спектр зондуючого імпульсу знаходиться поблизу частоти ω^*. Тобі виграш в енергії відбитого від цілі сигналу складає η раз. Відношення сигнал/шум μ має вигляд:

$$\mu = \frac{G_t A_t \sigma(\omega)}{(4\pi)^2 R^4}\frac{P_t\tau}{N_0} = \frac{G_t A_t \sigma_{av}}{(4\pi)^2 R^4}\frac{P_t\tau}{N_0}\eta, \tag{2}$$

де R – відстань від радіолокаційної станції до цілі; G_t – коефіцієнт підсилення передавальної антени; A_t – ефективна площа апертури приймальної антени; P_t – потужність передавача моноімпульсної радіолокаційної станції; τ – тривалість імпульсу передавача; N_0 – спектральна щільність білого шуму приймача.

Тоді виграш у відношенні сигнал/шум складатиме в η раз. Очевидно, що збільшення співвідношення сигнал/шум відповідає ефективному росту потужності передавача також в η раз, що підтверджує важливість використання адаптивної процедури при моноімпульсній радіолокації малопомітних об'єктів.

Дисперсія помилок оцінок параметрів цілі (дальності, кутових координат, швидкості та ін.) обернено пропорційні відношенню сигнал/шум μ для відбитого сигналу. Отже, абсолютні величини помилок зменшуються в $\sqrt{\eta}$ раз при зростанні відношення сигнал/шум в η раз.

Таким чином, застосування адаптивної процедури моноімпульсної радіолокації дозволяє в певних випадках суттєво (в кілька разів) знизити помилки визначення параметрів цілі.

Відзначимо, що для завдання виявлення цілі адаптація параметрів виявленого імпульсу не дає виграшу по чутливості, так як в умовах відсутності інформації про спектральні характеристики цілі (апріорної невизначеності) ефективність процедури адаптації виявляється невисокою. У той же час при наявності додаткової апріорної інформації про характер цілі можлива часткова адаптація з відповідним зростанням співвідношення сигнал/шум, що призведе не тільки до поліпшення оцінок параметрів цілі, але і до збільшення дальності виявлення.

Для детермінованого фізично реалізованого сигналу $S(t)$ може бути введений пов'язаний з Фур'є сигнал $S(\omega)$, причому обидва ці сигналу пов'язані парою перетворень Фур'є:

$$S(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{i\omega t}d\omega, \qquad S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)e^{-i\omega t}dt. \tag{3}$$

В такому випадку спектр може бути однозначно визначено по тимчасовій залежності сигналу. Однак, в реальних установках завжди присутні власні шуми, крім того, навіть у гіпотетичному випадку відсутності шумів точність вимірювання залежності $S(t)$ на практиці не може бути нескінченною. Зазначені причини зумовлюють необхідність при визначенні спектра сигналу виходити з більш загальної моделі, що враховує як наявність внутрішніх шумів, так і кінцеву інструментальну точність вимірювання сигналу. Таким чином, для аналізу процесу вимірювання спектра необхідно виходити з моделі фільтрації сигналу $S(t)$ в приймальних шумах установки $n(t)$.

Нехай на вході приймального пристрою є реалізація випадкового процесу $x(\omega)$ тривалістю T, що представляє собою суміш сигналу $S(t)$ з невідомими параметрами і стаціонарного гаусівського шуму $n(t)$:

$$x(t) = S(t) + n(t). \tag{4}$$

За конкретної реалізації $x(t)$ потрібно визначити спектральні характеристики квазідетермінованого сигналу $S(t)$.

Нехай для визначеності тривалість τ сигналу $S(t)$ значно менше часу вимірювання T випадкового процесу $x(t)$. В даному випадку для реалізації випадкового процесу справедливо перетворення Фур'є відповідно до виразу (3). Однак в силу випадкового характеру процесу $x(t)$ його Фур'є-образ також буде випадковою величиною:

$$x(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)e^{i\omega t}dt=\int_{-\infty}^{\infty}S(t)e^{i\omega t}dt+\int_{-\infty}^{\infty}n(t)e^{i\omega t}dt=S(\omega)+n(\omega)\,. \quad (5)$$

Визначимо характеристики вимірювання спектра $S(\omega)$, що отримані при обробці випадкового процесу $x(t)$. Візьмемо в якості оцінки $\overline{S}(\omega)$ спектра $S(t)$ спектр випадкової величини. Очевидно, що оцінка спектра $\overline{S}(\omega)$ також є випадковою величиною. Середнє значення, $\overline{S}(\omega)$, тобто середнє по ансамблю значення спектра $x(\omega)$ випадкового процесу $x(t)$ знайдемо, враховуючи, що середнє значення $n(\omega)$ дорівнює нулю:

$$\overline{S}(\omega)=<x(\omega)>=S(\omega)\,. \quad (6)$$

Таким чином, оцінка спектра $\overline{S}(\omega)$ незміщена. Для дисперсії комплексного випадкового процесу $\overline{S}(\omega)$ маємо [4,5]

$$D\{\overline{S}(\omega)\}=<|x(\omega)-S(\omega)|^2>=<|n(\omega)|^2>=G_T(\omega)\,. \quad (7)$$

де $G_T(\omega)$ пропорційна спектральній щільності процесу $n(t)$, розрахована для реалізації довжиною T.

Вираз $G_T(\omega)$ через кореляційну функцію $K(\tau)$ процесу $n(t)$, знайдемо:

$$D\{\overline{S}(\omega)\}=\int_{-T/2}^{T/2}\int_{-T/2}^{T/2}<n(t_1)n(t_2)>e^{-i\omega(t_1-t_2)}dt_1dt_2=\int_{-T/2}^{T/2}\int_{-T/2}^{T/2}K(t_1-t_2)e^{-i\omega(t_1-t_2)}dt_1dt_2\,. \quad (8)$$

Після заміни змінних і інтегрування отримаємо

$$D\{\overline{S}(\omega)\}=\int_{-T}^{T}(T-|\tau|)K(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau\,, \quad (9)$$

що для випадкового процесу $n(t)$ з білим спектром ($K(\tau)=N_0\delta(\tau)$) дає

$$D\{\overline{S}(\omega)\}=N_0T\,.$$

Таким чином, дисперсія виявляється тим більша, чим довший інтервал спостереження T. Очевидно, що при усередненні по всій реалізації дисперсія не прямує до нуля, тобто процес $n(\omega)$ не є ергодичним [1].

Вибираючи мінімально можливий інтервал спостереження, рівний тривалості сигналу τ (що можна зробити, якщо приблизно відома відстань до цілі), для дисперсії оцінки спектра знайдемо:

$$D\{\overline{S}(\omega)\}=N_0\tau\,, \quad (10)$$

Таким чином, помилка вимірювання спектра не залежить від величини спектральної амплітуди, тобто відносна точність буде найбільшою для максимальних значень спектральних амплітуд $S(\omega)$. Для компонент з частотою ω^* близько максимуму спектра $S(\omega)$ отримаємо таке значення відносної точності вимірювань

$$\delta^2(\omega^*)=D\{\overline{S}(\omega)\}/|\overline{S}^2(\omega)|_{\max}=N_0\tau/|\overline{S}^2(\omega)|_{\max}\,. \quad (11)$$

Припускаючи, що спектр сигналу $S(\omega)$ не має вузьких і високих піків, відношення сигнал/шум можна приблизно записати в наступному вигляді

$$\mu\approx|\overline{S}^2(\omega)|_{\max}\,\Delta\omega/(2\pi N_0)=|\overline{S}^2(\omega)|_{\max}/(N_0\tau)\,, \quad (12)$$

де враховано, що в силу широкосмуговості виконується співвідношення $\Delta\omega\tau\approx 2\pi$ між ефективною шириною спектра і тривалістю імпульсу. З виразів (11) і (12) остаточно для відносної помилки визначення спектральних амплітуд маємо:

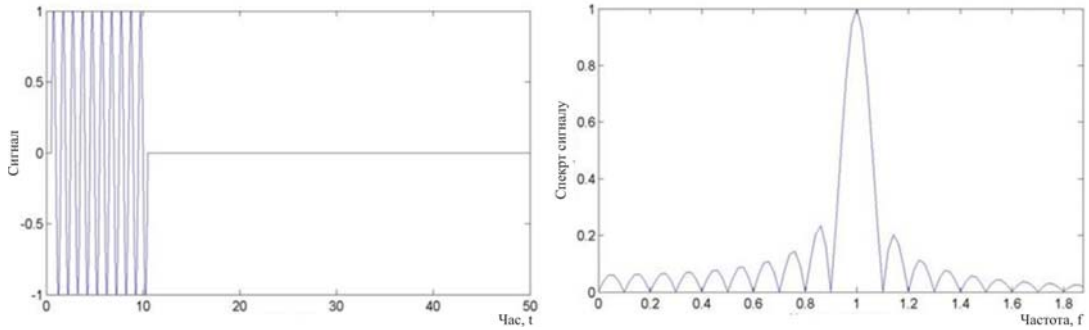
$$\delta(\omega^*)\geq\frac{1}{\mu^{1/2}}\,. \quad (13)$$

Така ж відносна помилка буде і для $\sigma(\omega)$, так як спектр зондуючого сигналу $S_0(\omega)$ в силу великого відношення сигнал/шум для нього може бути виміряний з точністю, що істотно перевищує (13).

Таким чином, вимір спектральних компонентів ефективної відбиваючої цілі може бути реалізовано по вимірюванню спектра відбитого імпульсу, причому відносна помилка виміру виявляється тим менше, чим більше відношення сигнал/шум.

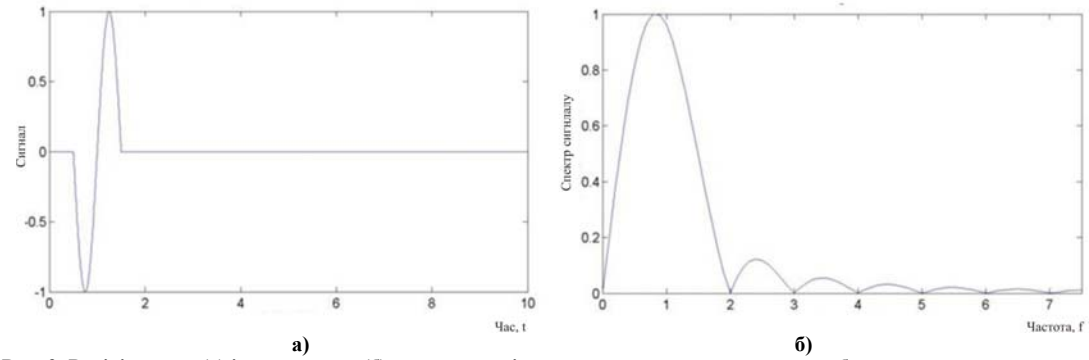
Практична реалізація. В якості моделі відеоімпульсу було використано синусоїдальне коливання (рис. 1), що складається з одного періоду, причому довжина періоду була прийнята за одиницю (все відлічувалося в частках періоду вихідного відеоімпульсу). Загальна довжина відрізка моделювання в цьому випадку вибиралася рівною 10 періодам. Радіоімпульс (рис. 2) містив 10 періодів синусоїдальних коливань, а загальна довжина відрізка моделювання дорівнювала 50 періодам.

На рис. 1 і рис. 2 представлені також спектри вихідного відеоімпульсу і радіоімпульсу. Величина спектра нормована для наочності на максимальне значення, а частота нормована на середню частоту сигналу. Така нормування дозволяє єдиним чином описувати імпульси з різною середньою частотою, роблячи результати моделювання реалізованими для різних практичних ситуацій.



а) б)

Рис. 1. Відеоімпульс (а) і його спектр (б), що використані для чисельного моделювання роботи адаптивної процедури підстроювання спектра. Час унормовано на тривалість одного періоду, частота – на середню частоту спектра сигналу



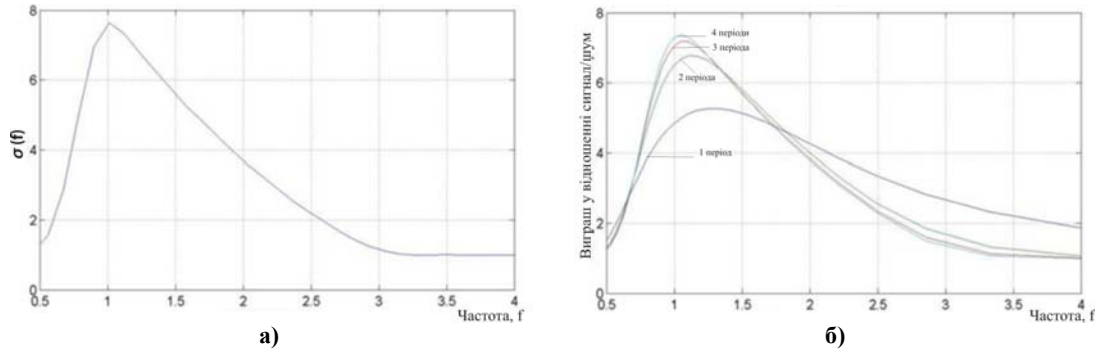
а) б)

Рис. 2. Радіоімпульс (а) і його спектр (б), використані для чисельного моделювання роботи адаптивної процедури підстроювання спектра. Час унормовано на тривалість одного періоду, частота – на середню частоту спектра сигналу

Для числового моделювання адаптивного підстроювального спектра виявленого сигналу була використана форма залежності (рис. 3,а) спектральної ефективної відбиваючої цілі $\sigma(f)$ від частоти. Відповідно до рис. 3,а, відбивання виявленого імпульсу від цілі моделювалось як проходження імпульсу через фізично реалізований лінійний фільтр з постійними параметрами з амплітудно-частотною характеристикою $\sigma(f)$.

$$S_1(f) = \sigma(f) S_0(f), \tag{14}$$

де $S_1(f)$ – спектр відбитого сигналу, $S_0(f)$ – спектр зондую чого сигналу. Крива $\sigma(f)$ мала один максимум, причому величина максимуму буда в одному випадку в 2 рази більшою середнього значення ефективної відбитої поверхні, а в іншому – в 7.5 разів більша середнього значення.



а) б)

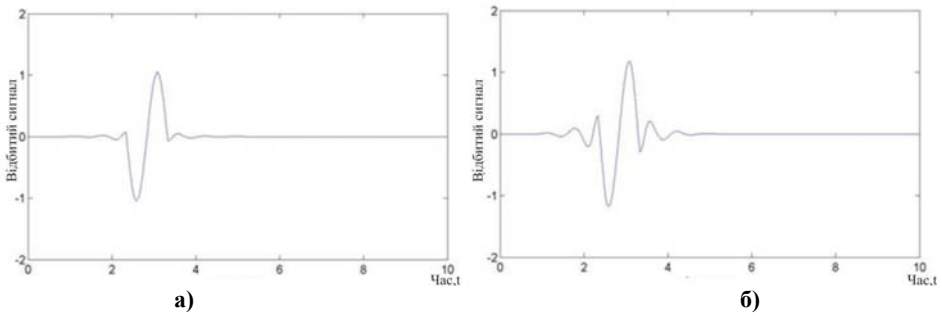
Рис. 3. Залежність спектральної ефективної відбитої поверхні $\sigma(f)$ від частоти (а), б – виграш у відношенні сигнал/шум при адаптивному підстроюванні тривалості виявленого імпульсу і числа періодів (крива *n* – число періодів) при подальшому збільшенні числа періодів відношення сигнал/шум не росте. Відносна висота максимуму $\sigma(f)$ дорівнює 7.5

Відеоімпульси, що відбиті від цілі (пройшли через лінійний фільтр (14)), представлені на рис. 4. Відзначимо, що зміна форми імпульсу для $(\sigma(f))_{\max} = 2$ несуттєве, в той час, як для $(\sigma(f))_{\max} = 7{,}5$ на початку і кінці імпульсу з'являються спадаючі коливання, які означають суттєву зміна спектрального складу імпульсу.

Дійсно, при $(\sigma(f))_{\max} = 2$ відбуваються тільки несиметричні зміни високих бокових пелюсток спектра відносно центральної. Для $(\sigma(f))_{\max} = 7{,}5$ трансформація спектру відеоімпульсу виявляється більш значною, аж до того, що центральна пелюстка спектра відбитого сигналу стає двогорбною, а перший бічний максимум виростає майже в три рази в порівнянні з вихідним сигналом. Ширина головної пелюстки спектру

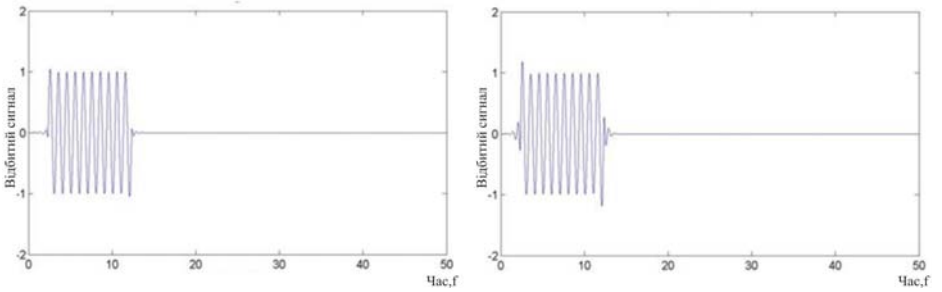
сигналу вибрана в порівняні з шириною максимуму спектральної ефективної відбиваючої цілі, що, очевидно, відповідає можливим характеристикам максимумів $\sigma(f)$ літальних апаратів (середня довжина хвилі відеоімпульсу становить 0.3-1.5 м).

Спектр радіоімпульсу значно вужчий від спектра відеоімпульсу, тому радіоімпульс практично не змінює форму при проходженні через лінійний фільтр (14), тобто форма спектру змінюється незначно. У разі радіоімпульсу (рис. 5) ширина його спектру виявляється значно меншою від ширини спектра ефективної відбиваючої поверхні цілі $\sigma(f)$ (довжина хвилі радіоімпульсу близько 3 см).



а) б)

Рис. 4. Вид відбитого від цілі відеоімпульсу для $(\sigma(f))_{\max} = 2$ (а) і $(\sigma(f))_{\max} = 7{,}5$ (б)



а) б)

Рис. 5. Вид відбитого від цілі радіоімпульсу для $(\sigma(f))_{\max} = 2$ (а) і $(\sigma(f))_{\max} = 7{,}5$ (б)

Висновки. Запропоновано адаптивна процедура підстроювання спектра виявленого імпульсу у відповідності з частотними діапазонами максимального значення ефективного відбитого об'єкта. В результаті радіолокації цілі широкосмуговим імпульсом по спектру відбитого сигналу визначаються частоти, на яких ефективна відбиваюча поверхню цілі приймає максимальне значення. Спектр випромінюваного сигналу перебудовується так, щоб його основна енергія, що знаходиться поблизу цих частот. Застосування такої процедури дозволяє поліпшити точність визначення параметрів мети без відповідного збільшення потужності передавача, причому виграш в певних випадках може бути в кілька разів.

Література

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И.Тихонов. – М. : "Радио и Связь", 1982.
2. Соколов А.В. Вопросы перспективной радиолокации : коллективная монография / А.В. Соколов. – М. : Радиотехника, 2003. – 512 с.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М. : "Советское радио", 1969.
4. Куликов Е.И. Оценка параметров сигналов на фоне помех / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов. – М. : "Советское радио", 1978.
5. Богданович В.А. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов / В.А. Богданович, А.Г. Вострецов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.

References

1. Tihonov V.I. Statisticheskaja radiotehnika / V.I.Tihonov. – M., "Radio i Svjaz'", 1982.
2. Sokolov A.V. Voprosy perspektivnoj radiolokacii. Kollektivnaja monografija / A.V. Sokolov. – M.: Radiotehnika, 2003. – 512 s.
3. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoj radiotehniki / B.R. Levin. – M., "Sovetskoe radio", 1969.
4. Kulikov E.I. Ocenka parametrov signalov na fone pomeh / E.I. Kulikov, A.P. Trifonov. – M., "Sovetskoe radio", 1978.
5. Bogdanovich V.A. Teorija ustojchivogo obnaruzhenija, razlichenija i ocenivanija signalov / V.A. Bogdanovich, A.G. Vostrecov – M.: FIZMATLIT, 2004. – 320 s.

Рецензія/Peer review : 07.06.2017 р. Надрукована/Printed :05.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

УДК 681.518.3: 535.243.2

С.М. КВАТЕРНЮК
Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ ПОХИБОК ЗАСОБУ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ НЕОДНОРІДНИХ БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

У роботі проаналізовано похибки засобу телевізійного вимірювального контролю та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ для прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції за місцем їх виникнення. Досліджено залежності інструментальної та методичної складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів. Оптимальна структура засобу мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю обирається з компромісу між зростанням інструментальної похибки та зменшенням методичної похибки зі зростанням кількості спектральних каналів.

Ключові слова: мультиспектральний контроль, неоднорідні біологічні середовища, засіб контролю, телевізійний вимірювальний контроль.

S. M. KVATERNYUK
Vinnytsia National Technical University

ANALYSIS OF ERRORS IN THE MEANS OF MULTISPECTRAL TELEVISION MEASUREMENT CONTROL PARAMETERS AND DIAGNOSING THE STATE OF HETEROGENEOUS BIOLOGICAL MEDIA

The errors of the means of television measurement control and diagnosing the state of inhomogeneous biological media for applied tasks of environmental monitoring, biomedical diagnostics and quality control at the place of their origin are analyzed. The dependences of the instrumental and methodological component of the error in measuring the parameters of inhomogeneous biological media on the number of spectral channels are studied. The optimal structure of the multispectral television measuring instrument is selected from a compromise between the growth of the instrumental error and the reduction of the methodical error with an increase in the number of spectral channels.

Keywords: multispectral control, heterogeneous biological environment, control means, TV measurement control.

Вступ

На основі результатів опрацювання оптичних характеристик неоднорідних біологічних середовищ можливо опосередковано виміряти їх біофізичні та структурні параметри. Для прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції важливим є можливість проведення швидких неінвазивних досліджень, оскільки їх результати необхідні для оперативного реагування на відхилення цих параметрів від нормальних значень. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення достовірності контролю параметрів неоднорідних біологічних середовищ за рахунок вдосконалення методу мультиспектральних телевізійних вимірювань. Засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю дозволяють вимірювати координати у n-вимірному мультиспектральному просторі у кожному пікселі зображення на відміну від засобів цифрової колориметрії зображень, які вимірюють координати кольору у тривимірному колірному просторі [1, 2]. Метою роботи є вдосконалення засобів мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю та діагностування параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

Аналіз структурної схеми засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань

Структурну схему засобу телевізійного вимірювального контролю параметрів та діагностування стану неоднорідних біологічних середовищ на мультиспектральних телевізійних вимірювань представлено на рис. 1. Пристрій містить джерело випромінювання з яким оптично з'єднано дифузний розсіювач, об'єкт дослідження та шкала зразків дифузного відбиття. Об'єктив оптично з'єднано з входом CCD-камери, яка через мікроконтролерний реєструючий пристрій під'єднана до блоку автокалібрування мультиспектральних параметрів. Здійснюється автокалібрування результатів мультиспектральних вимірювань відносно зразку з відомим значенням коефіцієнту дифузного відбивання $M_i' = M_i / R(\lambda_i)$. Отримані результати подаються на блок розрахунку параметрів неоднорідних біологічних середовищ з використанням регресійного рівняння [1]:

$$f_x = b_{0,0} + \sum_{i=1}^{n} \left(b_{1,i} M_i' + b_{2,i} M_i'^2 + b_{3,i} M_i'^3 + \ldots b_{k,i} M_i'^k \right), \quad (1)$$

де M_i' – мультиспектральні параметри (координати у n-вимірному мультиспектральному просторі), $b_{k,i}$ – регресійні коефіцієнти.

Розраховані параметри неоднорідних біологічних середовищ порівнюються з нормою. У випадку, якщо хоча б один з цих параметрів не відповідає нормі приймається висновок про непридатний стан об'єкта дослідження.

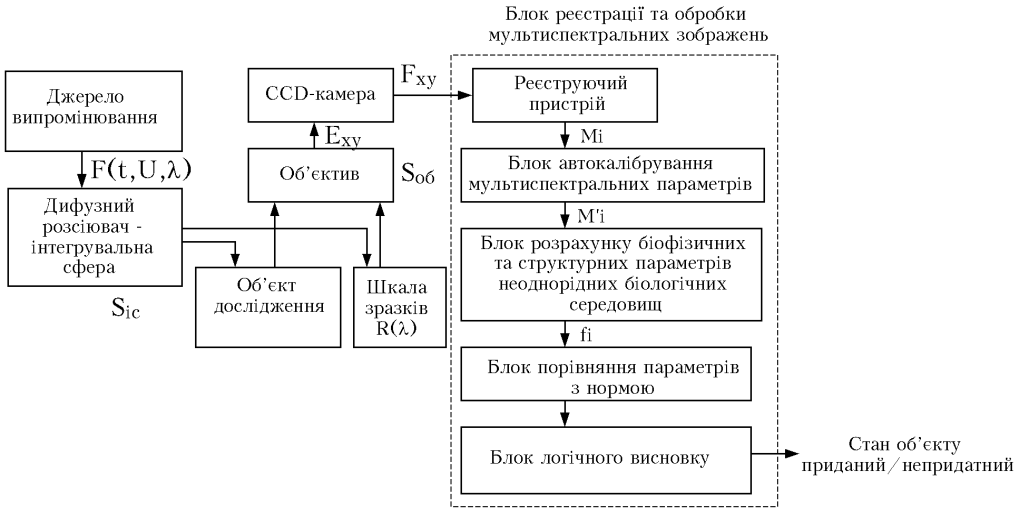


Рис. 1. Структурна схема засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань

Аналіз інструментальних похибок вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ

У лабораторних макетах засобів мультиспектральних телевізійних вимірювань у якості джерел випромінювання використовуються лінійки світлодіодів із застосуванням кола зворотного зв'язку для стабілізації світлового потоку, що забезпечує довготривалу стабільність випромінювання на рівні $\delta_{source} = 5\%$.

Похибка, що створюється інтегрувальною сферою δ_{dd} визначається такими складовими, як δ_{ρ} – відхилення значення коефіцієнту дифузного відбивання матеріалу стінок внутрішньої порожнини інтегрувальної сфери від номінального значення пов'язане зі зміною фізичного стану покриття; δ_{tol} – похибка, що визначається конструктивними допусками при виготовленні сфери:

$$\delta_{tol} = \frac{\Delta S_{sphere}}{S_{sphere}} 100\% = \frac{2\Delta r_{sphere}}{r_{sphere}} 100\% = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-2}} 100\% = 0,033\%, \quad (2)$$

Таким чином обчислимо загальну похибка, що створюється інтегрувальною сферою

$$\delta_{dd} = \sqrt{\delta^2_{\rho} + \delta^2_{tol}} = \sqrt{0,5^2 + 0,033^2} = 0,501\ \%. \quad (3)$$

Похибка, що створюється за рахунок спотворення зображення елементами об'єктиву CCD-камери $\delta_{obj} = 0,5\%$, визначається такими складовими, як сферичні аберації, кома, астигматизм, дисторсія, хроматичні аберації. Об'єктив CCD-камери розрахований на відстань до об'єкту діагностування 300 мм, що відповідає діаметру інтегрувальної сфери, при цьому забезпечуються мінімальні спотворення зображення.

Похибка аналого-цифрового перетворення виникає за рахунок кінцевої кількості дозволених рівнів сигналу при квантуванні за рівнем $\delta_{ADC\,ccd}$ та інструментальної похибки, зумовленої наявністю шумів та випадкових завад у CCD камері $\delta_{noise\,ccd}$. Виникнення інструментальної похибки обумовлене багатьма факторами та її закон розподілу близький до нормального. Обчислимо її значення на основі співвідношення сигнал-шум для CCD камери $D_{S/N} = 70$ дБ

$$\delta_{noise\,ccd} = 100\% / \left(10^{D_{s/n}/20}\right) = 100\% / \left(10^{70/20}\right) = 0,032\%. \quad (3)$$

Похибка квантування $\delta_{ADC\,ccd}$ при великій кількості розрядів може бути описана прямокутним законом розподілу, що відповідає рівній щільності ймовірності похибки квантування в межах $\pm h_k / 2$, де h_k – крок квантування. З врахуванням максимальних та мінімальних рівнів сигналу на елементах матриці:

$$\delta_{ADC\,ccd} = \frac{F_H}{2 \cdot F_{X\max} \cdot 2^n} \cdot 100\% = \frac{1}{2 \cdot 2^8} \cdot 100\% = 0,2\%. \quad (4)$$

Середньоквадратичне значення похибки квантування [3]

$$\delta_{SD\,ADC\,ccd} = \frac{\delta_{ADC\,ccd}}{\sqrt{12}} = 0,056\%. \quad (5)$$

Систематична складова похибки вимірювання координат у n-вимірному мультиспектральному просторі визначається похибками, що створюються джерелом випромінювання δ_{source}, дифузним розсіювачем δ_{dd} та об'єктивом δ_{obj}. Визначимо значення систематичної складової похибки вимірювання координат у n-вимірному мультиспектральному просторі, враховуючи, що дія впливних факторів незалежна:

$$\delta_{sys.M} = \sqrt{\delta^2{}_{source} + \delta^2{}_{dd} + \delta^2{}_{obj}} = \sqrt{5^2 + 0,501^2 + 0,5^2} = 5,05\%. \quad (6)$$

При виконанні автокалібрування систематична складова похибки вимірювання мультиспектральних параметрів компенсується. Випадкова складова похибки вимірювання мультиспектральних параметрів визначається похибками за рахунок шумів та квантування при аналого-цифровому перетворенні:

$$\delta_{rand.Mi} = \sqrt{\delta^2{}_{noise.ccd} + \delta^2{}_{ADC.ccd}} = \sqrt{0,032^2 + 0,056^2} = 0,064\%. \quad (7)$$

Випадкова складова похибки вимірювань параметрів середовища буде визначатись випадковими похибками відповідних мультиспектральних параметрів, які потрапили у загальне регресійне рівняння

$$\delta_{\text{instr.}} = \delta_{rand.f} = \sqrt{\delta^2{}_{rand.M1} + \delta^2{}_{rand.M2} + ... + \delta^2{}_{rand.Mi}}. \quad (8)$$

Графік залежності випадкової складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів наведено на рис. 2. Аналізуючи залежність випадкової складової інструментальної похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів можна помітити, що вона зростає пропорційно $\sqrt{N}$.

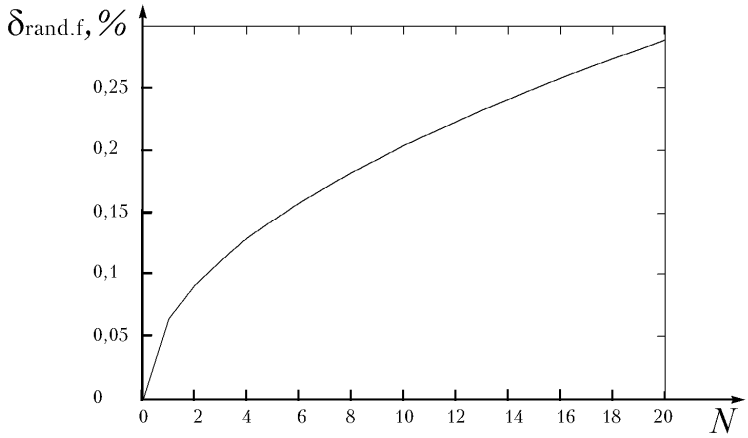


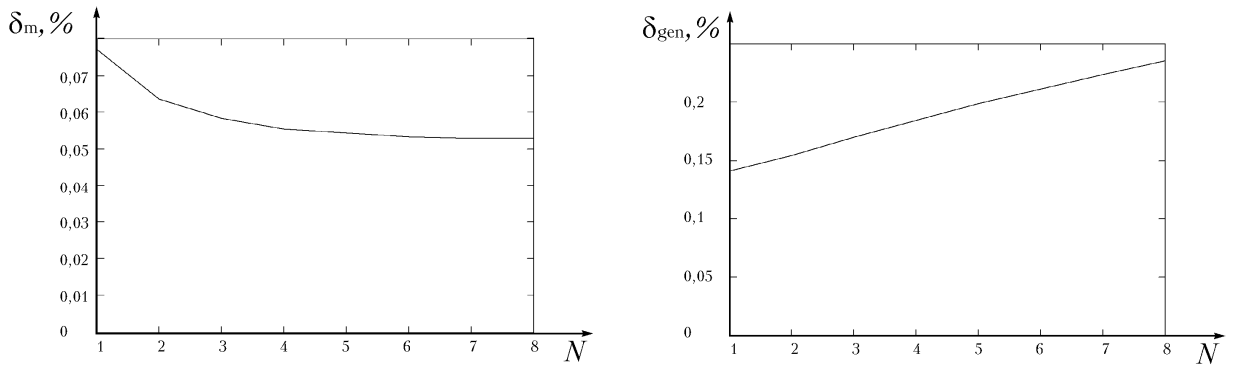
Рис. 2. Залежність випадкової складової похибки вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів

Аналіз методичної та загальної похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ

На основі математичного моделювання процесу вимірювання координат у n-вимірному мультиспектральному просторі для кожного пікселя зображення можливо опосередковано визначити з використанням множинної регресії [1] необхідні біофізичні та структурні параметри неоднорідних біологічних середовищ. Загальна схема математичної моделі відновлення біофізичних і структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ за мультиспектральними параметрами описана у роботі [4]. За умови відомих параметрів неоднорідних біологічних середовищ розраховують мультиспектральні параметри у кожному пікселі зображення, тобто розв'язують пряму оптичну задачу. Далі з використанням регресійних рівнянь, що пов'язують параметри неоднорідних біологічних середовищ та мультиспектральні параметри [5] здійснюють опосередковане вимірювання необхідних біофізичних чи структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, тобто розв'язують обернену оптичну задачу. Якщо у таку математичну модель процесу вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ за мультиспектральними параметрами не вносити інструментальних похибок, що відповідають ПЗЗ-камері, фільтрам та джерелам випромінювання, то отримана різниця між заданими значеннями параметрів та відновленими після множинної регресії значеннями відповідатиме саме методичній складовій похибки. На рис.3,а наведена залежність методичної складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів на прикладі відновлення коефіцієнту оксигенації крові. Наведена залежність методичних похибок вимірювання від кількості спектральних каналів отримана у ході складного імітаційного моделювання багатошарового неоднорідного біологічного середовища. При цьому помітно, що методична складова похибки вимірювань при збільшенні кількості спектральних каналів зменшується з кожним кроком все менше, за рахунок більш точної відповідності регресійного рівняння математичній моделі нелінійного біологічного середовища. Розрахуємо загальну похибку вимірювань біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ, як суму інструментальної і методичної похибок:

$$\delta_{gen} = \delta_{\text{instr.}} + \delta_m. \quad (9)$$

Отримана залежність загальної похибки вимірювання біофізичних та структурних параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів на прикладі відновлення коефіцієнту оксигенації крові наведена на рис. 3,б.



а) б)

Рис. 3. Приклад залежності методичної та загальної похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів

Оскільки при зростанні кількості спектральних каналів інструментальна складова похибки зростає, а методична складова похибки зменшується, то для вибору оптимальної кількості спектральних каналів засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань необхідно обрати такі спектральні канали, що забезпечать мінімальну загальну похибку вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ.

Висновки

Проаналізовано похибки засобу вимірювання координат у n-вимірному мультиспектральному просторі неоднорідних біологічних середовищ для прикладних задач екологічного моніторингу, біомедичної діагностики та контролю якості продукції за місцем їх виникнення. Проаналізовано залежності інструментальної та методичної складової похибки вимірювання параметрів неоднорідних біологічних середовищ від кількості спектральних каналів. Встановлено, що загальна похибка вимірювань не перевищує 0,25%. При цьому оптимальна кількість спектральних каналів засобу мультиспектральних телевізійних вимірювань обирається з компромісних міркувань між зростанням випадкової складової похибки при зростанні кількості каналів та зменшенні методичної похибки за рахунок більш точного відображення регресійним рівнянням математичної моделі неоднорідного біологічного середовища.

Література

1. Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ / С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 1. – С. 15–22.

2. Аналіз похибок засобу діагностування на основі вимірювання координат кольору нормальних і патологічних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 2. – С. 135–139.

3. Булатов В. Н. Элементы и узлы информационных и управляющих систем (основы теории и синтеза) : учебное пособие / В. Н. Булатов. – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2002. – 200 с.

4. Моделювання спектральних характеристик шару епідермісу біотканини шкіри як об’єкту біомедичної діагностики / В. Г. Петрук, О. Є. Кватернюк, Ю. С. Любчик, С. М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 218–222.

5. Математичне моделювання впливу параметрів окремих шарів на спектральні характеристики неоднорідних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 3. – С. 50–56.

References

1. Kvaternyuk S. M. Metod ta zasoby multyspektralnogo televizijnogo vymiryuvalnogo kontrolyu stanu neodnoridnyh biologichnyh seredovyshh / S. M. Kvaternyuk // Visnyk Vinnyczkogo politehnichnogo instytutu. – 2017. – №1. – P. 15–22.

2. Analiz pohybok zasobu diagnostuvannya na osnovi vymiryuvannya koordynat koloru normalnyh i patologichnyh biotkanyn / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, O. Ye. Kvaternyuk [ta in.] // Vymiryuvalna ta obchyslyuvalna texnika v texnologichnyx procesax. – 2015. – №2. – P. 135–139.

3. Bulatov V. N. Elementyi i uzlyi informatsionnyih i upravlyayuschih sistem (osnovyi teorii i sinteza): Uchebnoe posobie / V. N. Bulatov. – Orenburg : GOU VPO OGU, 2002. - 200 p.

4. Modelyuvannya spektralnyh harakterystyk sharu epidermisu biotkanyny shkiry yak obyektu biomedychnoyi diagnostyky / V. G. Petruk, O. Ye. Kvaternyuk, Yu. S. Lyubchy`k, S. M. Kvaternyuk // Visnyk Hmelnyczkogo nacionalnogo universytetu. Seriya: Texnichni nauky. – 2015. – № 2. – P. 218–222.

5. Matematychne modelyuvannya vplyvu parametriv okremyh shariv na spektralni harakterystyky neodnoridnyh biotkanyn / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, O. Ye. Kvaternyuk [ta in.] // Visnyk Vinnyczkogo politehnichnogo instytutu. – 2015. –№3. – P. 50–56.

Рецензія/Peer review : 27.07.2017 р. Надрукована/Printed :11.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Петрук В.Г.

УДК 621.396

Є.С. ЛЄНКОВ
Військовий інститут телекомунікацій і інформатизації

ЗАГАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СКЛАДНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТУ

У статті запропонована загальна математична модель процесу технічного обслуговування складного технічного об'єкта. Модель призначена для прогнозування показників надійності і вартості експлуатації об'єкта з урахуванням проведення різних стратегій технічного обслуговування. Розроблена модель дозволяє формально описати процес технічного обслуговування. Проведена формалізація покладена в основу розробки імітаційної статистичної моделі.

Ключові слова: технічне обслуговування, математична модель, технічний стан.

E.S. LYENKOV
Military Institute of Telecommunications and Information

GENERAL MATHEMATICAL MODEL OF MAINTENANCE PROCESS COMPLEX TECHNICAL OBJECT

The article proposes a general mathematical model of the process of maintenance of a complex technical object. The model is designed to predict the reliability and cost of operation of the facility, taking into account different maintenance strategies. Complex technical objects relate to a class of renewable objects of long repeated use and require significant costs for their operation. Maintenance is usually performed to ensure the required level of fault in the process of their operation. A characteristic feature of complex technical objects is the presence in their composition of a large number of different types of component elements that have different levels of reliability, different patterns of processes of their wear, aging and degradation. This feature requires a more subtle approach to the organization and planning of maintenance during their operation. The developed model allows to formally describe the process of maintenance. The formalization is the basis for the development of a simulation statistical model. The corresponding simulation model can be used to predict the reliability and cost of operating a complex technical facility, taking into account different maintenance strategies and planned repairs.

Keywords: maintenance, mathematical model, technical condition.

Вступ. На теперішній час, складні технічні об'єкти в відіграють виключно важливе значення. У першу чергу йдеться про різноманітні радіоелектронні комплекси, радіолокаційні станції, автоматизовані системи управління і т.п. Від рівня безвідмовності таких об'єктів залежить обороноздатність держави, економічна безпека та життя людей.

Складні технічні об'єкти відносяться до класу відновлюваних об'єктів тривалого багаторазового застосування і вимагають значних витрат на їх експлуатацію. Для забезпечення необхідного рівня безвідмовності в процесі їх експлуатації зазвичай проводиться технічне обслуговування (ТО).

Характерною особливістю складних технічних об'єктів є наявність в їх складі великої кількості різнотипних комплектуючих елементів, які мають різний рівень надійності, різні закономірності процесів їх зносу, старіння та деградації. Ця особливість вимагає більш тонкого підходу до організації і планування ТО в процесі їх експлуатації.

Постановка завдання. У статті вирішується завдання щодо розробки загальної математичної моделі технічного обслуговування складного технічного об'єкту для прогнозування показників надійності об'єкта РЕТ і вартості його експлуатації з метою оптимізації характеристик як самого об'єкта так і процесу його ТО.

Результати дослідження. Проведений аналіз процесу технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) показав, що процеси ТО і технічного ремонту (ТР) тісно взаємопов'язані і їх вивчати й досліджувати можна тільки як єдиний процес [1–3]. Тому процес ТО будемо розглядати як одну зі складових узагальненого процесу ТОіР, що включає в себе процеси ТО і поточний ремонт. З урахуванням цього процес ТО будемо описувати графом станів і переходів, показаним на рис. 1. Згідно з цим процес ТО в кожен момент часу перебуває в одному з таких станів:

0 – об'єкт працездатний і застосовується за призначенням;

1 – об'єкт відмовив і проводиться його відновлення (поточний ремонт);

2 – проводиться ТО об'єкта.

Переходи $0 \leftrightarrow 1$ описують процес ТР, а переходи $0 \leftrightarrow 2$ – процес технічного обслуговування.

Будемо розрізняти контроль працездатності та контроль технічного стану (КТС). Результатом контролю працездатності є прийняття рішення про те,у якому стані знаходиться об'єкт, в працездатному або в непрацездатному. Результатом КТС є рішення про необхідність проведення ТО. Перехід $0 \leftrightarrow 2$ відповідає часу проведення контролю технічного стану. Контроль працездатності в розглянутому процесі окремо не виділений.

Введемо параметр $\mathbf{T}$ у вигляді наступного вектора $\mathbf{T} = \{t_{0i};\, i = \overline{1, |E_0|}\}$, де t_{0i} – моменти часу останніх оновлень елементів $e_i \in E_0$ (E_0 – множина елементів об'єкта). Зміни значень $\mathbf{T}$ відбуваються в моменти часу t_k, в які проводиться ТО або проводиться відновлення (заміна) елементів, що відмовили

(k = 1, 2, …). Зміни, що відбуваються в моменти часу t_k будемо описувати оператором наступного вигляду:

$$\mathsf{T}_k := Q_{\text{ТО}}(\mathsf{T}_{k-1} / \text{Р}_{\text{ТО}}), \tag{1}$$

де $\mathsf{T}_k = \mathsf{T}(t_k)$ – значення параметра T після проведення ТО в момент часу t_k; $\text{Р}_{\text{ТО}}$ – параметри виконаного ТО; $Q_{\text{ТО}}$ – позначення самого оператора.

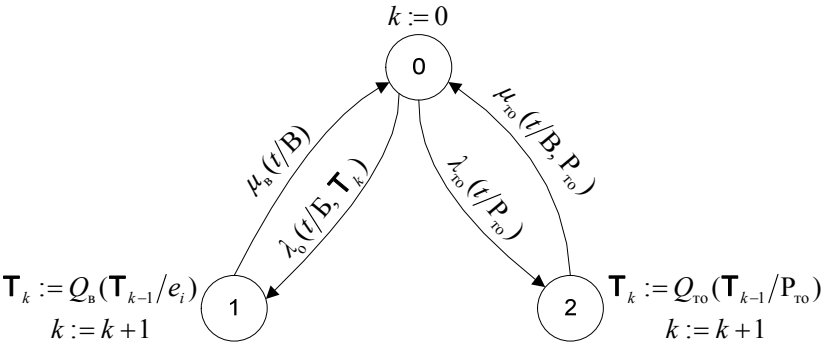


Рис. 1. Граф станів і переходів процесу ТО

Оператор $Q_{\text{ТО}}$ реалізується шляхом виконання в моменти часу t_k наступних дій (операторів присвоєння): $\forall e_i \in E_{\text{ТО}} : t_{0i} := t_k$, де $E_{\text{ТО}}$ – множина елементів, що зазнали ТО в момент часу t_k.

Аналогічному перетворенню піддається параметр T в моменти часу t_k, в які відбувається відновлення (заміна) елемента, що відмовив:

$$\mathsf{T}_k := Q_{\text{В}}(\mathsf{T}_{k-1} / e_i), \tag{2}$$

де e_i – відновлений елемент ($e_i \in E_{\text{О}}$); $Q_{\text{В}}$ – позначення оператора відновлення.

Оператор $Q_{\text{В}}$ реалізується оператором присвоювання $t_{0i} := t_k$.

Переходи між станами розглянутого процесу відбуваються у випадкові або детерміновані моменти часу, відповідно інтенсивностям переходів: $\lambda_{\text{О}}(t/\text{Б}, \mathsf{T}_k)$ – інтенсивність відмов об'єкта; $\mu_{\text{В}}(t/\text{В})$ – інтенсивність відновлення об'єкта; $\lambda_{\text{ТО}}(t/\text{Р}_{\text{ТО}})$ – інтенсивність подій ТО (інтенсивність КТС); $\mu_{\text{ТО}}(t/\text{В}, \text{Р}_{\text{ТО}})$ – інтенсивність подій завершення технічного обслуговування.

Розглянемо кожну з інтенсивностей переходів.

Будемо вважати, що елементи об'єкта $e_i \in E_{\text{О}}$ з'єднані в розумінні надійності послідовно і відмови є незалежними. Тоді інтенсивність відмов $\lambda_{\text{О}}(t/\text{Б}, \mathsf{T}_k)$ можна визначити як суму [1,4]:

$$\lambda_{\text{О}}(t/\text{Б}, \mathsf{T}_k) = \sum_i \lambda_i(t/t_{0i}), \tag{3}$$

де $\lambda_i(t/t_{0i})$ – інтенсивність відмов i-го елемента за умови, що останнє його відновлення відбулося в момент часу t_{0i} ($i = \overline{1, |E_{\text{О}}|}$).

Інтенсивність $\lambda_i(t/t_{0i})$ через функцію розподілу наробітку до відмови елемента $F_i(t/t_{0i})$ виражається наступним відомим співвідношенням [1,5]:

$$\lambda_i(t/t_{0i}) = \frac{F_i'(t/t_{0i})}{1 - F_i(t/t_{0i})}. \tag{4}$$

Апріорі передбачається, що об'єкт РЕТ є старіючим, тому в якості функції розподілу $F_i(t/t_{0i})$ може бути використано один з розподілів, що відноситься до ІФ-моделей відмов.

Інтенсивність відновлення $\mu_{\text{В}}(t/\text{В})$ будемо вважати константою, $\mu_{\text{В}}(t/\text{В}) = \mu_{\text{В}} = const$. Це припущення ніяк не вплине на адекватність розроблюваної моделі, так як інтенсивність $\mu_{\text{В}}(t/\text{В})$ не залежить від параметрів $\text{Р}_{\text{ТО}}$. При такому припущенні час відновлення підпорядковується експоненціальному розподілу з параметром $\mu_{\text{В}}$, величина якого дорівнює $\mu_{\text{В}} = 1/T_{\text{В}}$, де $T_{\text{В}}$ – середній час відновлення об'єкта.

Наближене значення $T_{\text{В}}$ визначається за формулою [1]:

$$T_{\text{В}} = \frac{\sum_i T_{\text{В}i} / T_{\text{ср}i}}{\sum_i 1/T_{\text{ср}i}}, \tag{5}$$

де $T_{\text{в}\,i}$ – середній час відновлення *i*-го елемента; $T_{\text{ср}\,i}$ – середній наробіток до відмови *i*-го елемента.

Технічне обслуговування проводиться періодично в детерміновані або випадкові моменти часу з періодичністю $T_{\text{ТО}}$. З урахуванням цього інтенсивність $\lambda_{\text{ТО}}(t/\text{Р}_{\text{ТО}})$ можна визначити за допомогою дельта-функції наступним чином:

$$\lambda_{\text{ТО}}(t/\text{Р}_{\text{ТО}}) = \delta(t - kT_{\text{ТО}}), \tag{6}$$

де $\delta(\cdot)$ – дельта-функція [1]; *k* – порядковий номер ТО (*k* = 1, 2, …); $T_{\text{ТО}}$ – періодичність ТО, яка може бути як постійною (детермінованою), так і змінною (випадковою) у разі застосування адаптивної стратегії технічного обслуговування.

Інтенсивність переходів $2 \to 0$ – $\mu_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}})$ визначається з співвідношення наступним чином:

$$\mu_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}}) = \frac{F'_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}})}{1 - F_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}})}, \tag{7}$$

де $F_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}})$ – функція розподілу тривалості технічного обслуговування.

Позначимо $\xi_{\text{ТО}}$ випадкову величину, яка підпорядковується функції розподілу $F_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}}) = Імов\{\xi_{\text{ТО}} \le t\}$. Величина $\xi_{\text{ТО}}$ визначається як сума наступного вигляду:

$$\xi_{\text{ТО}} = \xi_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}}) = \tau_{\text{ТО а}} + \tau_{\text{КТС}} + \sum_{i \in E_{\text{ТО}}} P_{\text{ТО}\,i}(t/\text{Р}_{\text{ТО}}) \cdot \tau_{\text{ТО}\,i}, \tag{8}$$

де $\tau_{\text{ТО а}}$ – адміністративний час (підготовка апаратури, приладів, інструментів тощо); $\tau_{\text{КТС}}$ – тривалість контролю ТС об'єкта; $\tau_{\text{ТО}\,i}$ – тривалість операції ТО *i*-го елемента; $P_{\text{ТО}\,i}(t/\text{Р}_{\text{ТО}})$ – ймовірність того, що при проведенні чергового ТО в момент часу *t* буде підлягати обслуговуванню *i*-й елемент ($e_i \in E_{\text{ТО}}$).

Згідно (8) випадкова тривалість ТО $\xi_{\text{ТО}}$ залежить від часу проведення ТО *t* (часу переходу $0 \to 2$), що цілком узгоджується з реальністю: чим гірший ТС об'єкта, тим більша частина елементів повинна піддаватися ТО і, отже, більшою буде тривалість технічного обслуговування. Якщо при проведенні ТО фактичний ТС об'єкта не враховується (при ТО за ресурсом), то величина $\xi_{\text{ТО}}$ не буде залежати від часу *t*.

Величини $\tau_{\text{ТО а}}$ і $\tau_{\text{ТО}\,i}$ в (8) у дійсності є випадковими, однак без істотного порушення адекватності моделі можна прийняти припущення про те, що вони є детермінованими величинами, які дорівнюють їх математичному очікуванню. При прийнятті цього припущення виявляється, що випадковість величини $\xi_{\text{ТО}}$ породжується тільки ймовірностями $P_{\text{ТО}\,i}(\text{Р}_{\text{ТО}})$. Очевидно, що ймовірності $P_{\text{ТО}\,i}(\text{Р}_{\text{ТО}})$ залежать від вибору стратегії технічного обслуговування. Так, наприклад, якщо обрана стратегія ТО за станом, то ймовірність $P_{\text{ТО}\,i}(\text{Р}_{\text{ТО}})$ повинна залежати від поточного ТС *i*-го елемента. Якщо обрана стратегія ТО за ресурсом (ТОР), то для всіх елементів $e_i \in E_{\text{ТО}}$ ймовірності $P_{\text{ТО}\,i}(\text{Р}_{\text{ТО}}) = 1$. В останньому випадку величина $\xi_{\text{ТО}}$ стає детермінованою величиною, рівною $\xi_{\text{ТО}} = \tau_{\text{ТО а}} + \sum_{i \in E_{\text{ТО}}} \tau_{\text{ТО}\,i}$. Інтенсивність $\mu_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}})$ у разі ТОР вироджується в дельта-функцію наступного вигляду:

$$\mu_{\text{ТО}}(t/\text{В},\text{Р}_{\text{ТО}}) = \delta(t - k(T_{\text{ТО}} + \xi_{\text{ТО}})) \quad (k = 1, 2, \ldots).$$

Таким чином, було розглянуто зміст і можливості визначення кожної з інтенсивностей переходів процесу, граф якого зображений на рис. 1. Проведений аналіз показав, що визначення деяких з них пов'язане з істотними труднощами, для їхнього визначення потрібні були б додаткові моделі та відповідні дослідження.

Якби вдалося отримати аналітичні вирази для інтенсивностей переходів розглянутого процесу, тоді можна було б скласти систему диференціальних рівнянь для ймовірностей станів процесу (рівняння Колмогорова [6]). Така система рівнянь у нашому випадку має наступний вигляд:

$$\begin{gathered}
P'_0(t/\ldots) = -P_0(t/\ldots)[\lambda_{\text{О}}(t/\text{Б},\mathsf{T}_k) + \lambda_{\text{ТО}}(t/\text{Р}_{\text{ТО}})] + P_1(t/\ldots)\mu_{\text{В}}(\text{В}) + P_2(t/\ldots)\mu_{\text{ТО}}(t/\text{Р}_{\text{ТО}}); \\
P'_1(t/\ldots) = P_0(t/\ldots)\lambda_{\text{О}}(t/\text{Б},\mathsf{T}_k) - P_1(t/\ldots)\mu_{\text{В}}(\text{В}); \\
P'_2(t/\ldots) = -P_0(t/\ldots)\mu_{\text{ТО}}(t/\text{Р}_{\text{ТО}}) + P_2(t/\ldots)\lambda_{\text{ТО}}(t/\text{Р}_{\text{ТО}}); \\
\sum_{j=0}^{2} P_j(t/\ldots) = 1,
\end{gathered} \tag{9}$$

де $P_j(t/\ldots)$ – ймовірності відповідних станів процесу ($j = \overline{0,2}$). Рішенням даної системи рівнянь є сімейство функцій $P_j(t/\ldots)$, що залежать від параметрів Б, В, $\text{Р}_{\text{ТО}}$ і T_k. Якщо параметри Б, В і $\text{Р}_{\text{ТО}}$ – це зовнішні, по відношенню до моделі змінні, то параметр T_k є внутрішньою змінною моделі. Динаміка

змінної T_k управляється операторами (1) і (2). Це істотно ускладнює розв'язок задачі.

Система диференціальних рівнянь (9) разом з операторами (1) і (2) являють собою загальну математичну модель процесу ТО об'єкта. Модель є загальною тому що вона може бути застосовна для будь-якої стратегії технічного обслуговування. Однак, скористатися цією загальною моделлю для розв'язання будь-яких практичних задач, на жаль, важко, тому що неясно, як інтегрувати систему рівнянь (9) разом з операторами (1) і (2).

Висновки. У статті розроблена загальна математична модель процесу технічного обслуговування та складного технічного об'єкту. Розроблена модель дозволяє формально описати процес технічного обслуговування. Проведена формалізація покладена в основу розробки імітаційної статистичної моделі. Відповідна імітаційна модель може застосовуватися для прогнозування показників надійності і вартості експлуатації складного технічного об'єкта з урахуванням проведення різних стратегій технічного обслуговування і планових ремонтів.

Література

1. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В. Банзак, В.О. Браун, В.А. Осыпа, С.А. Пашков, В.Н. Цыцарев, Ю.В. Березовская. – Одесса : Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.

2. Жиров Г.Б. Усовершенствованная имитационная модель процесса технического обслуживания и ремонта сложного технического объекта / Г.Б. Жиров, Е.С. Ленков // Журнал Харківського національного університету повітряних пил імені І. Кожедуба «Системи обробки інформації». – 2017. – Вип. 3 (149). – С. 14–18.

3. Лєнков Є.С. Узагальнена математична модель процесу технічного обслуговування і ремонту складної техніки / Є.С. Лєнков // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 2. – С. 186–191.

4. Основы надежности и техническое обеспечение радиоэлектронных средств РТВ ПВО / А.Н. Буточнов, Б.П. Креденцер, В.Г. Тоценко, В.Н. Цыцарев и др. – К. : КВИРТУ ПВО, 1982. – 226 с.

5. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб : БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М. : Наука, 1988. – 480 с.

References

1. Prohnozyrovanye nadezhnosty slozhnykh obektov radyoelektronnoi tekhnyky y optymyzatsyia parametrov ykh tekhnycheskoi ekspluatatsyy s yspolzovanyem ymytatsyonnykh statystycheskykh modelei / S.V. Lenkov, K.F. Boriak, H.V. Banzak, V.O. Braun, V.A. Osypa, S.A. Pashkov, V.N. Tsytsarev, Yu.V. Berezovskaia. – Odessa : Yzd-vo «VMV», 2014. – 256 s.

2. Zhyrov H.B. Usovershenstvovannaia ymytatsyonnaia model protsessa tekhnycheskoho obsluzhyvanyia y remonta slozhnoho tekhnycheskoho obekta / H.B. Zhyrov, E.S. Lenkov // Zhurnal Kharkivskoho natsionalnoho universytetu povitrianykh pyl imeni I. Kozheduba «Systemy obrobky informatsii». – 2017. – Vyp. 3 (149). – S. 14–18.

3. Lienkov Ye.S. Uzahalnena matematychna model protsesu tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu skladnoi tekhniky / Ye.S. Lienkov // Herald of Khmelnytsky National University. – 2017. – Issue 2. – S. 186–191.

4. Osnovy nadezhnosty y tekhnycheskoe obespechenye radyoelektronnykh sredstv RTV PVO / A.N. Butochnov, B.P. Kredentser, V.H. Totsenko, V.N. Tsytsarev y dr. – K. : KVYRTU PVO, 1982. – 226 s.

5. Polovko A. M. Osnovy teoryy nadezhnosty / A. M. Polovko, S. V. Hurov. – 2-e yzd., pererab. y dop. – SPb : BKhV-Peterburh, 2006. – 704 s.

6. Venttsel E. S. Teoryia veroiatnostei y ee ynzhenernye prylozhenyia / E.S. Venttsel, L.A. Ovcharov. – M. : Nauka, 1988. – 480 s.

Рецензія/Peer review : 10.07.2017 р. Надрукована/Printed :13.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

УДК.004.052

Г.Б. ЖИРОВ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

На теперішній час відсутні сучасні методи, математичні моделі, алгоритми і програмне забезпечення для зовнішнього автоматизованого проектування складних відновлювальних технічних систем на стадії проектування нових об'єктів та модернізації існуючих. Для цього необхідні сучасні інформаційні технології. В статті проводиться аналіз існуючих інформаційних технологій з визначення показників надійності складних технічних об'єкті та проаналізовано основні методи обробки діагностичної інформації.

Ключові слова: технічне обслуговування, інформаційна технологія, технічний стан.

G.B. ZHYROV
Military Institute , Kyiv National Taras Shevchenko University

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR PROVIDING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

At present, there are no modern methods, mathematical models, algorithms and software for the external automated design of complex restorative technical systems at the stage of designing new objects and modernization of existing ones. This requires modern information technology. One of the most important properties of complex technical objects, including radio-electronic, is reliability. When designing, manufacturing and operating complex technical objects, reliability is ensured by methods and means specific to each stage of the object's object. In this case, the operational reliability of renewable objects is most effectively achieved through the use of progressive maintenance and repair strategies. Strategies for diagnostics and monitoring are resource-saving technologies for the technical exploitation of renewable objects and therefore, their use is advisable and desirable. At the same time, the composition and method of implementation of the system of technical diagnostics and the system of technical monitoring are complex information systems. The article analyzes existing information technologies to determine the reliability indexes of complex technical objects and analyzes the basic methods of diagnostic information processing.

Keywords: maintenance, information technology, technical condition.

Вступ. Однією з найбільш важливих властивостей складних технічних об'єктів (СТО), в тому числі і радіоелектронних, є надійність. При проектуванні, виготовленні та експлуатації СТО надійність забезпечується методами і засобами характерними для кожного етапу "життєвого циклу" об'єкта (виробу). При цьому, експлуатаційна надійність відновлюваних об'єктів найбільш ефективно досягається з використанням прогресивних стратегій технічного обслуговування і ремонту (ТОіР), наприклад технічне обслуговування за "станом" з контролем рівня надійності (стратегія функціональної діагностики) та / або з контролем технічного стану (стратегія технічного моніторингу), для здійснення яких необхідні системи технічної діагностики (СТД) і системи технічного моніторингу (СТМ) відповідно.

Стратегії діагностики і моніторингу є ресурсозберігаючими технологіями технічної експлуатації відновлюваних об'єктів і тому, їх використання доцільно та бажано. Разом з тим, за складом і способом реалізації СТД і СТМ є складними інформаційними системами.

Аналіз праць в галузі кібернетики, інформатики, надійності і діагностики відомих вчених, таких як Н. Вінер, Х. Ешбі, Р. Барлоу, Ф. Байхельт, В.М. Глушков, А.А. Воронов, Б.В. Гнеденко, Е.Ю. Барзиловпч, Н.А. Северцев, А.Д. Соловьев, Н.А. Шишонок, М.К. Жердєв, Б.П. Креденцер, В.Г. Тоценко, показав, що на теперішній час, створено всі передумови успішного застосування СТД і СТМ для забезпечення експлуатаційної надійності складних відновлюваних об'єктів.

Аналіз сучасних методів системотехніки, теорії технічних систем і накопиченого досвіду створення і використання СТД і СТМ в різних галузях народного господарства показав, що в даний час відсутні сучасні методи, математичні моделі, алгоритми і програмне забезпечення для зовнішнього автоматизованого проектування таких систем на стадії проектування нових об'єктів та модернізації існуючих. Це не дозволяє розробити оптимальні, за заданими критеріями, системи.

Зростання обсягу функцій автоматизованого управління, з одного боку, і зростання рівня автоматизації процесів управління експлуатаційною надійністю, з іншого боку, в умовах обмежених витрат ще більше загострюють проблему пошуку раціонального технічного рішення будови систем діагностики і моніторингу, а також оптимальної системи технічного обслуговування і ремонту.

Постановка завдання. В статті вирішується завдання щодо аналізу існуючих інформаційних технологій по визначенню показників надійності складних технічних об'єктів.

Основний зміст. Проведений аналітичний огляд наукової літератури, присвяченій проблемам забезпечення експлуатаційної надійності складних технічних об'єктів, оснащених системами діагностики та моніторингу [1–8], дозволяє зробити наступні висновки.

По-перше, при створенні СТД і СТМ необхідна первинна апаратура для вимірювання та збору діагностичних параметрів.

По-друге, для переробки і візуалізації зібраної інформації потрібна вторинна інформаційно-обчислювальна техніка.

По-третє, для здійснення діагностування і моніторингу потрібні нові інформаційні технології щодо контролю стану об'єктів та системи ТОіР.

Інформаційні технології повинні включати в себе інформаційні процеси вимірювання параметрів сигналів, накопичення і перетворення цих сигналів за певними алгоритмами в діагностичну або прогнозну інформацію та інформаційні процеси зберігання, візуалізація і протоколювання накопичених даних. Використання для цих цілей комп'ютерної техніки дозволяє виконувати інформаційні процеси в автоматичному або в автоматизованому режимі за допомогою базисних процесів та апаратно-програмних засобів.

Таким чином, будь-яка інформаційна технологія складається з деякого числа інформаційних процесів, які обробляються за різними методиками (алгоритмами), та реалізуються за допомогою базисних апаратних і / або програмних процесів.

В даний час відомо декілька видів інформаційних технологій, які базуються на різних методиках отримання діагностичної інформації. Класифікація інформаційних технологій за ознакою технологічних процесів отримання кінцевих результатів наведена на рис. 1.

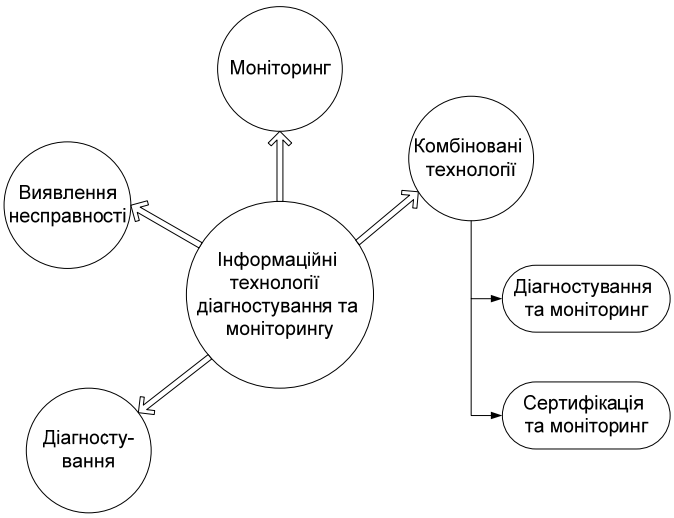


Рис. 1. Найбільш поширені інформаційні технології контролю стану СТО

Інформаційна технологія діагностування дозволяє отримувати оцінку поточного стану об'єкта на базі протоколів вимірювання технічних параметрів і протоколів перевищень даних параметрів поза норми. Дана технологія дозволяє проводити діагностування по одному виміру контрольованих параметрів.

Класифікація методик діагностики дозволяє виділити функціональну і тестову діагностику технічних об'єктів. У статті розглядається тільки функціональна діагностика, яка проводиться на працюючому об'єкті і, як правило, виконується з точністю до визначення одного з двох його станів: "справний – несправний", "працездатний – непрацездатний", "правильно функціонує – неправильно функціонує".

У більшості випадків зазначена оцінка стану об'єктів є незадовільною і тоді застосовується функціональна діагностика з використанням трирівневої оцінки.

В даному випадку мова йде про загальну функціональну діагностику або про загальну оцінку стану об'єкта. При цьому діагностика зводиться до визначення одного з вищеназваних станів об'єкта за допомогою моделей розпізнавання подій або станів. Головним недоліком загальної функціональної діагностики є те, що вона не дає відповіді на такі важливі для користувачів питання, як:

- які деталі, вузли і елементи об'єкта несправні?
- які види несправностей мають деталі, вузли, елементи та об'єкт в цілому?
- коли стався або станеться відмова деталі, вузла, елемента, об'єкта?

Відповісти на перше питання можна в тому випадку, якщо скористатися функціональної діагностикою з оцінкою стану об'єкту за сукупністю його технічних і технологічних параметрів. У цьому випадку мова йде про параметричну функціональну діагностику та очевидно, що для такого контролю необхідний чітко визначений набір діагностичних параметрів, що характеризують стан деталі, вузла, елемента і об'єкта в цілому, і потрібно точне знання їх допустимих, критичних та граничних значень. В цьому випадку діагностика зводиться до вимірювання діагностичних параметрів і порівнянню їх з допустимими, критичних та граничними значеннями. При цьому сукупність виміряних значень параметрів є протоколом стану об'єкта, а сукупність параметрів, значення яких знаходяться поза допуску, являють собою протокол перевищень параметрів. Однак, і в цьому випадку, можна тільки констатувати той чи інший стан, і неможливо вказати які види несправностей має даний об'єкт і / або коли стався або станеться відмова деталі, вузла або повна відмова самого об'єкта. На теперішній час, функціональна діагностика в чистому вигляді, як правило, не використовується. Вона, як мінімум, доповнюється функцією генезису стану об'єкта (визначення стану на будь-який з попередніх вимірів діагностичних даних) і / або функцією прогнозування

значень спостережуваних параметрів по їх тренду і / або функцією визначення дати найближчого контролю технічного стану.

Інформаційна технологія виявлення несправностей дозволяє відповісти на питання: "Які види прихованих несправностей має об'єкт?" Кінцевим продуктом даної технології є протокол виявлення прихованих дефектів, пошкоджень і руйнувань. Дана технологія дозволяє отримувати результат по одному виміру контрольованих параметрів.

Для того щоб реалізувати функцію виявлення несправностей необхідно мати критерії відмов деталей, вузлів, елементів і контрольованих об'єктів в цілому. Правильно обрані критерії дозволяють виявляти часткові і повні, стійкі і нестійкі, явні і неявні дефекти і пошкодження. При цьому відзначимо, що критерієм дефекту є допустиме, критичне та граничне значення одного або декількох діагностичних параметрів відповідного елемента контрольованого об'єкта. Використання критеріїв відмов лежить в основі будь-якого з методів розпізнавання дефектів.

На теперішній час, усі основні методики розпізнавання несправностей можна звести до трьох типів: методики ручного аналізу, методики створення детермінованих експертних систем і методики створення імовірнісних експертних систем.

Методика ручного аналізу найбільш складна, так як вимагає досвідченого фахівця, який повинен бути детально знайомий з методами параметричного (кореляційного, дисперсійного, регресійного), гармонійного і спектрального аналізу. Дві інші методики вимагають створення спеціальних експертних систем з досить непростими алгоритмами прийняття рішень. Відомий також і варіант комбінації експертних систем. Це імовірнісно-детерміновані системи. Їх використання дає найбільш високу збіжність розпізнавання. При цьому, спочатку, система налаштовується як стохастична, з досвіду або за аналогією, а потім, по мірі накопичення бази знань вона детермінується відомими випадками, які вже зустрічалися.

Інформаційна технологія моніторингу технічного стану як спосіб безперервного або періодичного спостереження за технічним станом об'єктів має більш широкі функціональні можливості і в загальному випадку включає в себе: визначення статусу, діагноз, генезис і прогноз стану об'єктів. Моніторинг на базі спектрального, параметричного і гармонійного аналізу діагностичних даних дозволяє обґрунтовано розпізнавати стан і прогнозувати відмови об'єктів. У зв'язку з цим він дозволяє попереджати виникнення аварій, планувати терміни і обсяг ремонту обладнання, визначати витрати трудових, матеріальних і фінансових ресурсів на техобслуговування і ремонт обладнання. Крім того, моніторинг дозволяє визначати й уточнювати необхідні і достатні критерії оцінки стану об'єктів і характерні ознаки різних несправностей.

В даний час відомо кілька методик здійснення моніторингу стану об'єктів. Головними ознаками цих методик є використовувані правила визначення безаварійної зупинки експлуатації об'єкту, який контролюється. До основних правил належать:

- правила граничного контролю,
- правила оптимального зупинки за критерієм ресурсної ефективності,
- правила максимізації залишкового ресурсу,
- правила гарантованого успіху.

Будь-яке з даних правил передбачає використання математичної моделі еволюції технічного стану або процесу деградації для визначення точної дати зупинки експлуатації об'єкта. При цьому математичні моделі, як правило, мають ситуаційний характер, тобто після кожного нового виміру діагностичних параметрів, уточнюється траєкторія параметричного вектора в просторі його значень. В даний час найбільшого поширення набули дві методики моніторингу технічного стану об'єктів. Обидві методики відносяться до класу методик безаварійної зупинки експлуатації об'єкта за правилом граничного контролю.

Сутність першої методики полягає у визначенні дати зупинки експлуатації об'єкта за датою перетину екстраполяційного полінома, що апроксимує процес зміни параметрів, що спостерігаються, з рівнем критичних (або граничних) значень цих параметрів.

Сутність другої методики полягає у визначенні дати зупинки експлуатації об'єкта за датою перетину екстраполяційного полінома, що апроксимує процес збільшення середніх значень параметрів, що спостерігаються, з рівнем критичних (або граничних) значень цих параметрів. Друга методика дає більш пізню дату зупинки експлуатації і може застосовуватися для визначення дати технічного обслуговування або ремонту, в той час як перша методика може застосовуватися для визначення дати чергового обстеження об'єкта.

Інформаційна технологія сертифікації проводиться в тому випадку, коли при виконанні діагностування об'єкта є можливість отримувати єдиний документ: сертифікат технічного стану об'єкта, в якому наведені: протокол загальної діагностики, протокол визначення несправних елементів об'єкта (протокол перевищень) і протокол визначення несправностей об'єкта.

В останні роки в області контролю технічного стану об'єктів замість функціональної діагностики стала використовуватися сертифікація. З точки зору методології діагностування технічних об'єктів, сертифікація є зручним способом контролю стану об'єктів, тому що однозначно і дуже повно характеризує поточний стан контрольованих деталей, вузлів, елементів і об'єкта в цілому. Наявність детермінованої або стохастичною експертної системи дозволяє автоматизувати цю методику, що робить її привабливою і функціонально повнішою.

Комбіновані інформаційні технології. Це поєднання двох, трьох і т. д. вище перелічених технологій. Найбільш популярними з них є інформаційна технологія діагностики і моніторингу, а також інформаційна технологія сертифікації з подальшою постановкою на моніторинг, виявлених при сертифікації несправних об'єктів. Друга інформаційна технологія є найменш витратною, тому що не допускає витрат на моніторинг стану справного обладнання.

При детальному розгляді інформаційних процесів будь-якої інформаційної технології можна помітити, що найбільша різноманітність притаманна саме інформаційному процесу вимірювання технічних параметрів. В основі цього процесу завжди лежить той чи інший метод неруйнівного контролю технічного стану об'єкта та методи обробки діагностичної параметрів та прийняття відповідного рішення.

Найбільш часто використовуються наступні методи:

– спектральний аналіз як окремо взятих, так і деякої смуги частот, отримав широке визнання після отримання можливості за допомогою мікропроцесорної техніки проводити швидкі перетворення Фур'є. Метод продуктивно використовується для контролю стану і для розпізнавання прихованих несправностей контрольованого обладнання [9–11];

– вейвлет-аналіз являє собою згортку вейвлет-функції з сигналом. Вейвлет-аналіз переводить сигнал з часового представлення частотно-часове. Перевагою даного виду аналізу є можливість його застосування для аналізу нестаціонарних сигналів, на відміну від Фурьє-аналізу [12–14];

– аналіз обвідної (часовий аналіз), використовується при вимірюванні параметрів високочастотних сигналів, потужність яких змінюється значно повільніше його періоду.

– фазо-часовий аналіз. На базі цього методу створено великий парк різних приладів, за допомогою яких виконуються, такі види робіт як балансування роторів турбін, турбогенераторів, електроагрегатів і т.д.;

– ударно-імпульсний аналіз. Метод базується на порівнянні пікових і середньоквадратичних значень параметрів вібрації.

Інформаційні технології реалізуються пакетами прикладних програм. У пакет крім основних програм обробки даних обов'язково входять сервісні програми з обслуговування баз даних і баз знань. У зв'язку з цим створювати пакет програм, для окремо взятої інформаційної технології не вигідно, оскільки доведеться кожного разу створювати власні, для даної технології, сервісні програми. У той же час створювати програмний продукт з повним набором інформаційних технологій також не вигідно, оскільки такий пакет буде явно надмірним і, як наслідок, дорогим. У цих умовах, виникає потреба раціонального вибору інформаційної технології в залежності від реальних потреб, для чого, в свою чергу, необхідно створити банк інформаційних технологій діагностики і моніторингу.

Висновки. В статті визначені та проаналізовані інформаційні технології по визначенню показників надійності складних технічних об’єктів, які базуються на різних методиках отримання діагностичної інформації. Проаналізовано основні методи обробки діагностичної інформації.

Література

1. Давыдов П.С. Техническое обслуживание радиоэлектронного борудования по состоянию / П.С. Давыдов. – М. : МИИГА, 1983. – 88 с.

2. 2 Гуляев В.А. Диагностическое обеспечение энергетического оборудования / В.А. Гуляев, В.М. Иванов. – Киев : ИЭД, 1982. – 66 с.

3. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М. : Мир, 1984. – 318 с.

4. Mitchel John S. An Introduction to Machinary Analisis and Monitoring. – Tusla: Penn Well Books, 1993.

5. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович. – М. : Высш. шк., 1982. – 231 с.

6. Кузякин В.И. Системы и стратегии технического обслуживания буровых установок / В.И. Кузякин // Надежность крупных машин : сборник научн.труд. – Екатеринбург : НИИТяжмаш, 1992. – С. 32–38.

7. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей / [С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В. Банзак и др.]. – Одесса : Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.

8. Основы надежности и техническое обеспечение радиоэлектронных средств РТВ ПВО / [А.Н. Буточнов, Б.П. Креденцер, В.Г. Тоценко, В.Н. Цыцарев и др.] – К. : КВИРТУ ПВО, 1982. – 226 с.

9. Афонский А.А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2009. – 248 с.

10. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров / В. П.Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

11. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб : Питер, 2006. – 751 с.

12. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск : РХД, 2001. – 464 с.

13. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П.Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2004. – 440 с.

14. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 672 с.

References

1. Davydov P.S. Tehnicheskoe obsluzhivanie radiojelektronnogo borudovanija po sostojaniju / P.S. Davydov. – M: MIIGA, 1983. – 88 s.

2. Guljaev V.A. Diagnosticheskoe obespechenie jenergeticheskogo oborudovanija / V.A. Guljaev, V.M. Ivanov. – Kiev: IJeD, 1982. – 66 s.

3. Dillon B. Inzhenernye metody obespechenija nadezhnosti sistem / B. Dillon, Ch. Singh. – M.: Mir, 1984. – 318s.

4. Mitchel John S. An Introduction to Machinary Analisis and Monitoring. – Tusla: Penn Well Books, 1993.

5. Barzilovich E.Ju. Modeli tehnicheskogo obsluzhivanija slozhnyh sistem / E.Ju. Barzilovich. – M.: Vyssh. shk., 1982. – 231 s.

6. Kuzjakin V.I. Sistemy i strategii tehnicheskogo obsluzhivanija burovyh ustanovok / V.I. Kuzjakin // Nadezhnost' krupnyh mashin. Sborni nauchn.trud. – Ekaterinburg: NIITjazhmash. – 1992. – S.32–38.

7. Prognozirovanie nadezhnosti slozhnyh ob#ektov radiojelektronnoj tehniki i optimizacija parametrov ih tehnicheskoj jekspluatacii s ispol'zovaniem imitacionnyh statisticheskih modelej / S.V. Lenkov, K.F. Borjak, G.V.Banzak, V.O.Braun, V.A.Osypa, S.A.Pashkov, V.N. Cycarev, Ju. V.Berezovskaja. – Odessa: Izd-vo «VMV», 2014. – 256 s.

8. Butochnov A.N. Osnovy nadezhnosti i tehnicheskoe obespechenie radiojelektronnyh sredstv RTV PVO / A.N. Butochnov, B.P.Kredencer, V.G.Tocenko, V.N.Cycarev i dr. – K.: KVIRTU PVO, 1982. – 226 s.

9. Afonskij A.A. Cifrovye analizatory spektra, signalov i logiki / A.A. Afonskij, V.P. D'jakonov. – M.: SOLON-Press, 2009. – 248 s.

10. D'jakonov V. P. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Obrabotka signalov i proektirovanie fil'trov / V. P.D'jakonov. – M.: SOLON-Press, 2005. – 576 s.

11. Sergienko A. B. Cifrovaja obrabotka signalov / A. B.Sergienko. – SPb.: Piter, 2006. – 751 s.

12. Dobeshi I. Desjat' lekcij po vejvletam / I.Dobeshi. – Izhevsk: RHD, 2001. – 464 s.

13. D'jakonov V. P. Vejvlety. Ot teorii k praktike / V. P.D'jakonov. – M.: SOLON-Press, 2004. – 440 s.

14. Malla S. Vejvlety v obrabotke signalov / S. Malla. – M.: Mir, 2005. – 672 s.

Рецензія/Peer review : 05.06.2017 р. Надрукована/Printed :10.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

УДК 621.391.251

Л.О. КОВТУН, Д.М. МЕДЗАТИЙ
Хмельницький національний університет

ОСНОВНІ ІДЕЇ ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО СЛОВНИКОВОГО КОДУВАННЯ МЕТОДОМ ЛЕМПЕЛЯ-ЗІВА

У статті наведено дослідження основної ідеї адаптивного словникового кодування методом Лемпеля-Зіва. Викладено хронологічний та порівняльний аналіз вдосконалених реалізацій методу. Наведено приклад та алгоритм виконання методу адаптивного кодування LZW.

Ключові слова: метод Лемпеля-Зіва, адаптивне кодування, словникове кодування.

L.O. KOVTUN, D.M. MEDZATYI
Khmelnytskyi National University

BASIC IDEAS AND ALGORITHMS OF ADAPTIVE DICTIONARY USING METHODS ENCODE LEMPEL-ZIV

The article presents a research of the basic idea of adaptive dictionary coding method Lempel-Ziv. Expounded chronological and comparative analysis of advanced implementations of the method. An example of the method and algorithm performance adaptive coding LZW. Compression is important in the transmission, processing and storing information. The use of effective compression methods allow fully digital telephone networks radically change the nature of the final movement and the general scope of local networks. Compression efficiency is difficult to assess, but these improvements will certainly give the advantage in speed of implementation. Compression methods used for encrypting and protecting data. Squeeze provides stored and transmitted to some degree of secrecy. First, it protects them from the casual observer. Second, by removing excess it makes it impossible to set a cryptanalyst inherent statistical natural language order. Thirdly, and most importantly, the model has a very big key, decryption is not possible. The use of adaptive model means that all key depends on the text transmitted system encoding/decoding during its initialization.

Keywords: Lempel-Ziv methods, adaptive coding, dictionary coding.

Вступ. Протягом останніх років спостерігається стрімке збільшення кількості комп'ютерів, які використовуються практично у всіх сферах життя і діяльності людини. Це зумовлюється розвитком телекомунікаційних систем, ростом пропускної здатності та загальної кількості ліній зв'язку, появою і розвитком глобальних комп'ютерних мереж, які стали доступні більшості з користувачів. Невпинно збільшується і кількість користувачів ЕОМ, а також і сфери застосування комп'ютерів. Це в свою чергу викликало збільшення об'ємів інформації, що зберігається, використовується та передається. У зв'язку з розширенням спектру послуг, які може надавати глобальна мережа та постійний її розвиток, успішне виконання проектів по виконанню переводу у цифровий вигляд інформації, що зберігається (наприклад, бібліотечні архіви, модульне середовище для навчання і т.п.), слід очікувати, що об'єми інформації, яка зберігається і передається, будуть продовжувати збільшуватись з тією ж, або навіть більшою швидкістю.

Тому задача пошуку методів, які дозволять зберігати та передавати текстову, графічну, звукову та інші види інформації у найбільш компактному вигляді, є актуальною.

Мета статті. Розкрити основну ідею та навести приклади і алгоритм виконання адаптивного словникового кодування методом Лемпеля-Зіва як засобу оборотного стиску текстової інформації і послідовності дискретних даних. Провести хронологічний і порівняльний аналіз вдосконалених реалізацій даного методу.

Актуальність досліджень. Оборотний стиск особливо важливий для текстів, які записані на природних і на штучних мовах, оскільки в цьому випадку помилки неприпустимі. Хоча першочерговою областю застосування розглянутих методів є стиск текстів, ця техніка може знайти застосування і в інших випадках, включаючи оборотне кодування послідовностей дискретних даних.

Існує багато причин виділяти ресурси ЕОМ в розрахунку на стиснений вигляд, оскільки більш швидка передача даних і зменшення місця для їх зберігання дозволяють зменшити витрати і часто поліпшити показники ЕОМ. Стиск ймовірно буде залишатися в сфері уваги через постійно зростаючі обсяги даних в ЕОМ, які потрібно зберігати та передавати. Крім того, його можна використовувати для подолання деяких фізичних обмежень, таких, наприклад, як порівняно низька ширина смуги пропускання телефонних каналів.

Одним з найбільш ранніх і добре відомих методів стиску інформації є алгоритм Хаффмана, який був і залишається предметом багатьох досліджень. Однак в кінці 70-х років завдяки двом важливим переломним ідеям він був витіснений. Одна полягала у відкритті методу арифметичного кодування, який має схожу з кодуванням Хаффмана функцію, але який володіє декількома важливими властивостями, що дають можливість досягти значної переваги в стиску. Іншим нововведенням був метод Лемпеля-Зіва, який дає ефективний стиск і застосовує підхід, зовсім відмінний від хаффманівського і арифметичного. Обидві ці техніки з часу своєї першої публікації значно вдосконалились, розвинулися і лягли в основу практичних високоефективних алгоритмів.

Існують два основних способи проведення стиску: статистичний і словниковий. Кращі статистичні методи застосовують арифметичне кодування, кращі словникові – метод Лемпеля-Зіва. У словникових методах групи послідовних символів або «фраз» замінюються кодом. Замінена фраза може бути знайдена в деякому «словнику».

Словникові методи Лемпеля-Зіва. В основі цих методів лежить ідея, абсолютно відмінна від ідеї

статистичного стиску. За допомогою словникового кодера відбувається стиск заміною груп послідовних символів (фрази) індексами деякого словника. Словником є список таких фраз, які, як очікується, будуть часто використовуватися. Індекси влаштовані так, що в середньому займають менше місця, ніж закодовані ними фрази, за рахунок чого і досягається стиск. Цей тип стиску ще відомий як «макро»-кодування або метод «книги кодів».

Словникові методи зазвичай швидкі з тих причин, що один код на виході відповідає кільком вхідним символам і розмір коду зазвичай відповідає машинним словам. Словникові моделі дають досить гарний стиск, хоча і не такий гарний, як у контекстно-обмежених моделях. Можна показати, що більшість словникових кодерів можуть бути відтворені за допомогою контекстно-обмежених моделей, тому їх головною перевагою є не якість стиску, а економія машинних ресурсів.

Головним моментом при проектуванні словникової схеми є вибір розміру запису кодового словника. Деякі розробники накладають обмеження на довжину збережених фраз, наприклад, при кодуванні діадами вони не можуть бути більше двох символів. Щодо цього обмеження вибір фраз може здійснюватися статичним, напівадаптивним або адаптивним способом. Найпростіші словникові схеми застосовують статичні словники, які містять тільки короткі фрази. Вони особливо годяться для стиску записів файлу, такого, наприклад, як бібліографічна база даних, де записи повинні декодуватись випадковим чином, але при цьому одна і та ж фраза часто з'являється в різних записах.

Статичні, адаптивні і неадаптивні моделі. Залежно від доступу кодера і декодера до моделі кодування виділяють три способи моделювання: статичне, напівадаптивне і адаптивне.

Статичне моделювання використовує для всіх текстів одну і ту ж модель. Вона задається при запуску кодера, можливо на підставі зразків типу очікуваного тексту. Така ж копія моделі зберігається разом з декодером. Недолік полягає в тому, що схема буде давати необмежено поганий стиск щоразу, коли текст, який кодується, не вписується в обрану модель, тому статичне моделювання використовують тільки тоді, коли важливі в першу чергу швидкість і простота реалізації.

Напівадаптивне моделювання вирішує цю проблему, використовуючи для кожного тексту свою модель, яка будується ще до самого стиску на підставі результатів попереднього перегляду тексту (або його зразка). Перед тим, як завершено формування стисненого тексту, модель повинна бути передана декодеру. Незважаючи на додаткові витрати на передачу моделі, ця стратегія в загальному випадку окупається завдяки кращій відповідності моделі тексту.

Адаптивне (або динамічне) моделювання звільняється від пов'язаного з цією передачею витратами. Спочатку і кодер, і декодер привласнюють собі деяку порожню модель, так, ніби всі символи були б рівноімовірними. Кодер використовує цю модель для стиску чергового символу, а декодер – для його розгортання. Потім вони обидва змінюють свої моделі однаковим чином (наприклад, нарощуючи ймовірність розглянутого символу). Наступний символ кодується і отримується на основі нової моделі, а потім знову змінює модель. Кодування триває аналогічним декодуванню чином, воно підтримує ідентичну модель застосуванням такого ж алгоритму її зміни, який забезпечений відсутністю помилок під час кодування. Використовувана модель, яку до того ж не потрібно передавати явно, буде добре відповідати стисненому тексту.

У адаптивних моделях, на відміну від напівадаптивних, не відбувається їх попередній перегляд. Тому вони є більш привабливими і краще стискаючими. Таким чином, алгоритми моделей, які описуються у статті, при кодуванні і декодуванні будуть виконуватися однаково. Модель ніколи не передається явно, тому збій відбувається тільки в разі нестачі під неї пам'яті.

Важливо, щоб значення ймовірностей, які присвоєні моделлю, не були рівними 0, оскільки якщо символи кодуються $-\log(p)$ бітами, то при наближенні ймовірності до 0 довжина коду буде прагнути до нескінченності. Нульова ймовірність має місце, якщо в зразку тексту символ не зустрівся жодного разу – розповсюджена ситуація для адаптивних моделей на початковій стадії стиску. Ця проблема відома як проблема нульової ймовірності, яку можна вирішити кількома способами. Один з них полягає в тому, щоб додавати 1 до лічильника кожного символу. Альтернативні підходи основані на ідеї виділення одного лічильника для всіх нових (з нульовою частотою) символів, для подальшого використання його значення. Адаптивні схеми, які допускають великі фрази, забезпечують кращий стиск.

Опис методу і його вдосконалені реалізації. Майже всі практичні словникові кодери належать сімейству алгоритмів, що походять з роботи Зіва і Лемпеля. Сутність полягає в тому, що фрази замінюються вказівником на те місце, де вони в тексті вже раніше з'являлися. Це сімейство алгоритмів називається методом Лемпеля-Зіва і позначається як LZ-стиск. Цей метод швидко пристосовується до структури тексту і може кодувати короткі функціональні слова, оскільки вони дуже часто в ньому з'являються. Нові слова і фрази можуть також формуватися з частин слів, які раніше зустрічались.

Декодування стисненого тексту здійснюється безпосередньо – відбувається проста заміна вказівника готовою фразою зі словника, на яку той вказує. Однією з форм такого вказівника є пара (m,l), яка замінює фразу з першого символу, що починається зі зміщенням *m* у вхідному потоці. Наприклад, вказівник (7,2) адресує 7-й і 8-й символи початкового рядка. Використовуючи це позначення, рядок «abbaabbbabab» буде закодований як «abba (1,3) (3,2) (8,3)». Зауважимо, що незважаючи на рекурсію в останньому вказівнику, створене кодування не буде двозначним.

Поширено невірне уявлення, що за поняттям LZ-методу стоїть єдиний алгоритм. Спочатку це був

варіант для вимірювання «складності» рядків, що призвів до двох різних алгоритмів стиску. Ці перші статті були глибоко теоретичними і лише наступні переклади інших авторів дали більш доступне уявлення. Ці тлумачення містять в собі багато нововведень, що створюють туманне уявлення про те, що таке LZ-стиск насправді. Через велику кількість варіантів цього методу кращий опис можна здійснити тільки через його зростаюче сімейство, де кожен член відображає своє рішення розробника. Ці версії відрізняються одна від одної в двох головних чинниках: чи є межа зворотного ходу вказівника, і на які підрядки з цієї множини він може посилатися. Просування вказівника в раніше переглянуту частину тексту може бути необмеженим (розширюється вікно) або обмежено вікном постійного розміру з N попередніх символів, де N зазвичай становить кілька тисяч. Обрані підрядки також можуть бути необмеженими або обмеженими безліччю фраз, які обрані згідно деякому задуму.

Кожна комбінація цих умов є компромісом між швидкістю виконання, об'ємом необхідної оперативної пам’яті і якістю стиску. Вікно, яке розширюється, пропонує кращий стиск за рахунок організації доступу до більшої кількості підрядків.

Але по мірі збільшення вікна кодер може сповільнити свою роботу через зростання часу пошуку відповідних підрядків, а стиск може погіршитись через збільшення розмірів вказівників. Якщо пам'яті для вікна буде не вистачати, стається збій процесу, що також погіршить стиск доки не відбудеться нового збільшення вікна. Вікно постійного розміру позбавлено цієї проблеми, але містить менше підрядків, які доступні вказівнику. Обмеження множини доступних підрядків розмірами фіксованого вікна зменшує розмір вказівників і пришвидшує кодування.

Відзначено найголовніші варіанти LZ-методу, які нижче будуть розглянуті більш детально. Всі вони походять від одного з двох різних підходів, які описані Зівом і Лемпелем [1–3, 5–7] і помічені відповідно як LZ77 і LZ78. Ці два підходи зовсім різні, хоча деякі автори вносять плутанину твердженнями про їх ідентичність. Термін «LZ-схеми» походить від імен їх винахідників. Зазвичай кожен наступний розглянутий варіант є поліпшенням більш раннього, і в наступних описах ми відзначимо їх попередників.

LZ77. Це перша опублікована версія LZ-методу. У ній вказівники позначають фрази в вікні постійного розміру, які є попередніми позиціями коду. Максимальна довжина вказівника підрядків, що замінюються, визначаються параметром F (зазвичай 10-20). Ці обмеження дозволяють LZ77 використовувати «змінне вікно» з N символів. З них перші $(N-F)$ були вже закодовані, а останні F складають попереджуючий буфер.

При кодуванні символу в перших $(N-F)$ символах вікна визначається найдовший рядок, що збігається з цим буфером. Він може частково перекривати буфер, але не може бути самим буфером.

Знайдена найбільша відповідність потім кодується тріадою $<i,j,a>$, де i – його зміщення від початку буфера, j – довжина відповідності, a – перший символ, який не відповідає підрядку вікна. Потім вікно зсувається вправо на (j+1) символ і готове до нового кроку алгоритму. Прив'язка певного символу до кожного вказівника гарантує, що кодування буде виконуватися навіть в тому випадку, якщо для першого символу попереджувального буфера не буде знайдено відповідності.

Об’єм пам'яті, необхідний кодеру і декодеру, обмежується розміром вікна. Зміщення (i) в тріаді може бути представлено $\lceil \log(N-F) \rceil$ бітами, а кількість символів, які замінюються тріадою, $j-\lceil \log F \rceil$ бітами.

Декодування здійснюється дуже просто і швидко. При цьому підтримується той же порядок роботи з вікном, що і при кодуванні, але на відміну від пошуку однакових рядків він, навпаки, копіює їх з вікна відповідно до чергової тріади.

Зів і Лемпель показали, що, при досить великому N LZ77 може стиснути текст не гірше, ніж будь-який, спеціально на нього налаштований напівадаптивний словниковий метод. Цей факт інтуїтивно підтверджується тим міркуванням, що напівадаптивна схема повинна мати крім самого кодованого тексту ще й словник, тоді як для LZ77 словник і текст – це одне і те ж. А розмір елемента напівадаптивного словника не меншого розміру відповідної йому фрази в кодованому LZ77 тексті.

Кожен крок кодування LZ77 вимагає однакової кількості часу, що є його головним недоліком в разі, якщо воно буде великим. Тоді пряма реалізація може зажадати до $(N-F)*F$ операцій порівнянь символів в фрагменті, який аналізується. Ця властивість повільного кодування і швидкого декодування властива для багатьох LZ-схем. Швидкість кодування може бути збільшена за рахунок використання двійкових дерев, дерева цифрового пошуку або хеш-таблиці, але обсяг необхідної пам'яті при цьому також зросте. Тому цей тип стиску є найкращим для випадків, коли одного разу закодований файл (переважно на швидкій ЕОМ з достатньою кількістю пам'яті) багато разів розгортається і, можливо, на повільній машині. Це часто трапляється на практиці при роботі, наприклад, з діалоговими довідковими файлами, посібниками, новинами, телетекстами і електронними книгами.

LZR. Подібний LZ77, за винятком того, що він дозволяє вказівникам в уже переглянутій частині тексту адресувати будь-яку позицію. Для LZ77 це аналогічно встановленню параметра N більше розміру вхідного тексту. Оскільки i та j в тріаді $<i,j,a>$ можуть зростати на довільно велике значення, вони представляються цілими кодами змінної довжини. Цей метод використаний Еліасом і позначений як $C(w')$. При кодуванні цілого позитивного числа довжина коду зростає в логарифмічній залежності від його розміру. Наприклад, коди для чисел 1, 8 і 16 відповідно становитимуть 0010,10010000 та 101100000.

Через відсутність обмеження на зростання словника, LZR не часто застосовується на практиці, оскільки при цьому процесі кодування потрібно все більше пам'яті для розміщення тексту, в якому визначаються відповідності. При використанні лінійного пошуку *n*-символьний текст буде закодований за час $O\left(n^2\right)$.

LZSS. Результатом роботи LZ77 і LZR є серія тріад, що представляють собою символи, які строго чергуються. Використання явного символу слідом за кожним вказівником є на практиці марнотратним, так як часто його можна зробити частиною такого вказівника. LZSS працює над цією проблемою, застосовуючи вільну послідовність вказівників і символів, причому останні включаються у випадку, якщо необхідно, щоб вказівник мав більший розмір, ніж кодований ним символ. Вікно з *N* символів застосовується так само, як і в LZ77, тому розмір вказівників постійний. До кожного вказівника або символу додається додатковий біт для відмінності їх між собою, а для усунення невикористовуваних бітів вихідна послідовність пакується LZSS.

LZB. Незалежно від довжини фрази, яка ним адресується, кожен вказівник в LZSS має сталий розмір. На практиці фрази з однаковою довжиною зустрічаються набагато частіше за інші, тому з вказівниками різної довжини можна досягнути кращого стиску. LZB став результатом експериментів по оцінці різних методів кодування вказівників, теж як явних символів, так і прапорців, які розрізняють їх. Метод дає набагато кращий, ніж LZSS, стиск і має додаткову перевагу в меншій чутливості до вибору параметрів. Першою складовою вказівника є позиція початку фрази від початку вікна. LZB працює відносно цієї компоненти. Спочатку, коли символів у вікні 2, розмір дорівнює 1 біту, потім, при 4-х символах в вікні, зростає до 2 бітів, і т.д., поки вікно не стане містити *N* символів. Для кодування другої складової (довжини фрази) вказівника LZB застосовують схему кодів змінної довжини Еліаса-С (gamma). Оскільки цей код може представляти фразу будь-якої довжини, то ніяких обмежень на неї не накладається.

LZH. Для подання вказівника LZB застосовують кілька простих кодів, але краще представлення може бути здійснено на підставі ймовірності їх розподілу за допомогою арифметичного кодування або кодування Хаффмана. LZH-система подібна LZSS, але застосовує для вказівників і символів кодування Хаффмана. При застосуванні одного з цих статистичних кодерів до LZ-вказівників, через витрати на передачу великої кількості кодів (навіть в адаптивному режимі) виявилося важко поліпшити стиск. Крім того, кінцевій схемі не вистачає швидкості і простоти LZ-методу.

LZ78. Новий підхід до адаптивного словникового стиску важливий як з теоретичної, так і з практичної точок зору. Він був першим в сімействі схем, що розвиваються паралельно (і в плутанині) з LZ77. Незалежно від можливості вказівників звертатися до будь-якого вже переглянутого рядка, переглянутий текст розбирається на фрази, де кожна нова фраза є найдовша з уже переглянутих плюс один символ. Вона кодується як індекс її префікса плюс додатковий символ. Після цього нова фраза додається до списку фраз, на які можна посилатися.

Наприклад, рядок "aaabbabaabaaabab", як показано в таблиці, ділиться на 7 фраз. Кожна з них кодується як вже фраза, яка раніше зустрічалась, плюс поточний символ. Наприклад, останні три символи кодуються як фраза номер 4 ("ba"), за якою слідує символ "b". Фраза номер 0 – порожній рядок.

Ввід	a	aa	b	ba	baa	baaa	bab
Номер фрази	1	2	3	4	5	6	7
Вивід	(0,a)	(1,a)	(0,b)	(3,a)	(4,a)	(5,a)	(4,b)

Дальність просування вперед вказівника необмежена (тобто немає вікна), тому в міру виконання кодування накопичується все більше фраз. Допущення довільно великої їх кількості вимагає по мірі розбору збільшення розміру вказівника. Коли розібрано *p* фраз, вказівник представляється $\lceil \log p \rceil$ бітами. На практиці словник не може продовжувати рости нескінченно. При вичерпанні доступної пам'яті вона очищається і кодування триває як би з початку нового тексту.

Привабливою практичною властивістю LZ78 є ефективний пошук в дереві цифрового пошуку за допомогою вставки. Кожен вузол містить номер фрази, яка ним представляється. Оскільки фраза, яка вставляється, буде лише на один символ довше однієї з тих, які їй передують, то для здійснення цієї операції кодеру потрібно буде тільки спуститися вниз по дереву на одну дугу.

Важливою теоретичною властивістю LZ78 є те, що при створені вихідного тексту стаціонарним ергодичним джерелом стиску є приблизно оптимальним по мірі зростання введення. Це означає, що LZ78 створить нескінченно довгий рядок до мінімального розміру, визначеного ентропією джерела. Лише деякі методи стиску володіють цією властивістю. Джерело є ергодичним, якщо будь-яка вироблена їм послідовність все точніше характеризує його по мірі зростання своєї довжини. Оскільки це досить слабке обмеження, то може здатися, що LZ78 є вирішенням проблеми стиску текстів. Однак оптимальність з'являється, коли розмір введення прямує до нескінченності, а більшість текстів значно коротші. Вона заснована на розмірі явного символу, який значно менший за розмір всього коду фрази. Оскільки його довжина 8 біт, він буде займати всього 20% виведення при створенні 2^{40} фраз. Навіть якщо можливе тривале введення, то пам'ять вичерпається задовго до того, як стиск стане оптимальним.

Реальна задача – подивитися, як швидко LZ78 сходиться до цієї межі. Як показує практика, збіжність ця відносно повільна, в цьому метод можна порівняти з LZ77. Причина великої популярності LZ-техніки на практиці не в її наближенні до оптимальності, а по тій причині, що деякі варіанти дозволяють здійснювати високоефективну реалізацію.

LZW. Перехід від LZ78 до LZW паралельний переходу від LZ77 до LZSS. Включення явного символу в вихідну послідовність після кожної фрази часто є марнотратним. LZW управляє повсюдним виключенням цих символів, тому вихідна послідовність містить тільки вказівники. Це досягається ініціалізацією списку фраз, що включає всі символи вихідного алфавіту. Останній символ кожної нової фрази кодується як перший символ наступної фрази. Особливої уваги потребує ситуація, що виникає при декодуванні, якщо фраза кодувалася за допомогою іншої, яка безпосередньо їй передувала, але це не є непереборною проблемою.

LZW був спочатку запропонований як метод стиску даних при записі їх на диск за допомогою спеціального обладнання каналу диска. Через високу вартість інформації, при такому підході важливо, щоб стиск відбувався дуже швидко. Передача вказівників може бути спрощена і прискорена при використанні для них постійного розміру в (як правило) 12 бітів. Після розбору 4096 фраз нових до списку додати вже не можна, і кодування стає статичним. Незалежно від цього, на практиці LZW досягає прийнятного стиску і для адаптивної схеми є дуже швидким. Перший варіант Міллера і Вегмана з [4] є незалежним винаходом LZW.

LZC. Схема, що застосовується програмою COMPRESS, яка використовується в системі UNIX. Вона починалася як реалізація LZW, але потім кілька разів змінювалася з метою досягнення кращого і швидшого стиску. Результатом стала схема з високими характеристиками, яка в даний час є однією з найбільш корисних.

Рання модифікація працювала з вказівниками змінної довжини як в LZ78. Розділ програми, що працює з вказівниками, для ефективності був написаний на асемблері. Щоб уникнути переповнення пам'яті словником у якості параметра повинна передаватися максимальна довжина вказівника (зазвичай 16 біт, але для невеликих машин менше). Перш ніж очистити пам'ять після заповнення словника, LZC стежить за коефіцієнтом стиску. Тільки після початку його погіршення словник очищається і знову будується з самого початку.

LZT. Заснований на LZC. Головна відмінність полягає в тому, що коли словник заповнюється, місце для нових фраз створюється скиданням найменш використовуваної останнім часом фрази (LRU-заміщення). Це ефективно здійснюється підтриманням саморегульованого списку фраз, організованого у вигляді хеш-таблиці. Список спроектований так, що фраза може бути замінена за рахунок невеликого числа операцій з вказівниками. Цей алгоритм трохи повільніший LZC, але більш продуманий вибір фраз в словнику забезпечує досягнення такого ж коефіцієнта стиску з меншими витратами пам'яті.

LZT також кодує номера фраз більш ефективно, ніж LZC за допомогою трохи кращого методу розбиття на фрази двійкового кодування (його можна застосувати також і до деяких інших LZ-методів). При цьому кодеру і декодеру потрібні невеликі додаткові витрати, які є незначними в порівнянні з завданням пошуку та підтримки LRU-списку. Другий варіант Міллера і Вегмана є незалежним винаходом LZT.

LZMV. Всі похідні від LZ78 алгоритми створюють для словника нову фразу шляхом додавання до вже існуючої фрази одного символу. Цей метод досить довільний, хоча, безсумнівно, робить реалізацію простою. LZMV використовує інший підхід для формування записів словника. Нова фраза створюється за допомогою конкатенації останніх двох кодованих фраз. Це означає, що фрази будуть швидко зростати, і не всі їх префікси будуть знаходитися в словнику. Фрази, які застосовуються нечасто, як і в LZT, при обмеженому розмірі словника будуть видалятися, щоб забезпечити адаптивний режим роботи. Взагалі, стратегією швидкого конструювання фрази LZMV досягається кращий стиск в порівнянні з нарощуванням фрази на один символ за раз.

LZJ. Являє собою новий підхід до LZ-стиску. Спочатку передбачуваний словник LZJ містить кожний унікальний рядок з уже переглянутої частини тексту, обмежений по довжині деяким максимальним значенням *h*. Кожній фразі словника присвоюється порядковий номер фіксованої довжини в межах від 0 до *H*-1. Для гарантії, що кожен рядок буде закодований, в словник включається безліч вихідних символів. Коли словник повний, він скорочується видаленням рядка, що з'являвся на вході тільки один раз.

Кодування і декодування **LZJ** виконується на основі структури дерева цифрового пошуку для зберігання підрядків з уже закодованої частини тексту. Висота дерева обмежена ***h*** символами і воно не може містити більше H вузлів. Рядок розпізнається за унікальним номером, який присвоєно відповідному йому вузлу. Процес декодування повинен підтримувати таке ж дерево методом перетворення номера вузла назад до підстроки, здійснюючи шлях вгору по дереву.

LZFG. Запропонований Фіалою і Гріні – це одні з найбільш практичних **LZ**-варіантів. Він дає швидке кодування і декодування, гарний стиск, не вимагаючи при цьому надмірної пам'яті. Він схожий з **LZJ** в тому, що втрати від можливості кодування однієї і тієї ж фрази двома різними вказівниками усуваються зберіганням кодованого тексту в вигляді дерева цифрового пошуку та розміщенням в вихідний файл позиції в дереві.

З використанням LZFG досягається більш швидкий стиск, ніж **LZJ**, за допомогою техніки з **LZ78**, де вказівники можуть починатися тільки за межами попередньої розібраної фрази. Це означає, що для кожної фрази, яка кодується, в словник вставляється одна фраза. На відміну від **LZ78**, вказівники включають компоненту по суті необмеженої довжини, яка вказує, як багато символів має бути скопійовано. Закодовані символи поміщені в вікні (в стилі **LZ77**), і фрази, які покидають вікно, видаляються з дерева цифрового пошуку. Для ефективного представлення кодів використовуються коди змінної довжини. Нові

фрази кодуються за допомогою лічильника символів, які слідують за символами.

Алгоритм методу LZW та дослідження ефективності його використання.

Алгоритм запропонованого методу наведено на рис. 1. Він полягає в наступному: на першому етапі відбувається ініціалізація словника всіма можливими односимвольними фразами та ініціалізація вхідної фрази W першим символом повідомлення (1). Далі відбувається зчитування наступного символу K (2) з повідомлення, яке кодується. Якщо настає кінець повідомлення і надходження символів більше не очікується, то необхідно забезпечити вивід коду для W (3-7-8-9).

В іншому випадку, якщо фраза W(K) вже є у словнику, то необхідно вхідній фразі надати значення W(K) і перейти до кроку №2, інакше видати код W, додати W(K) у словник, надати вхідній фразі значення K і перейти кроку №2 (4-5-6).

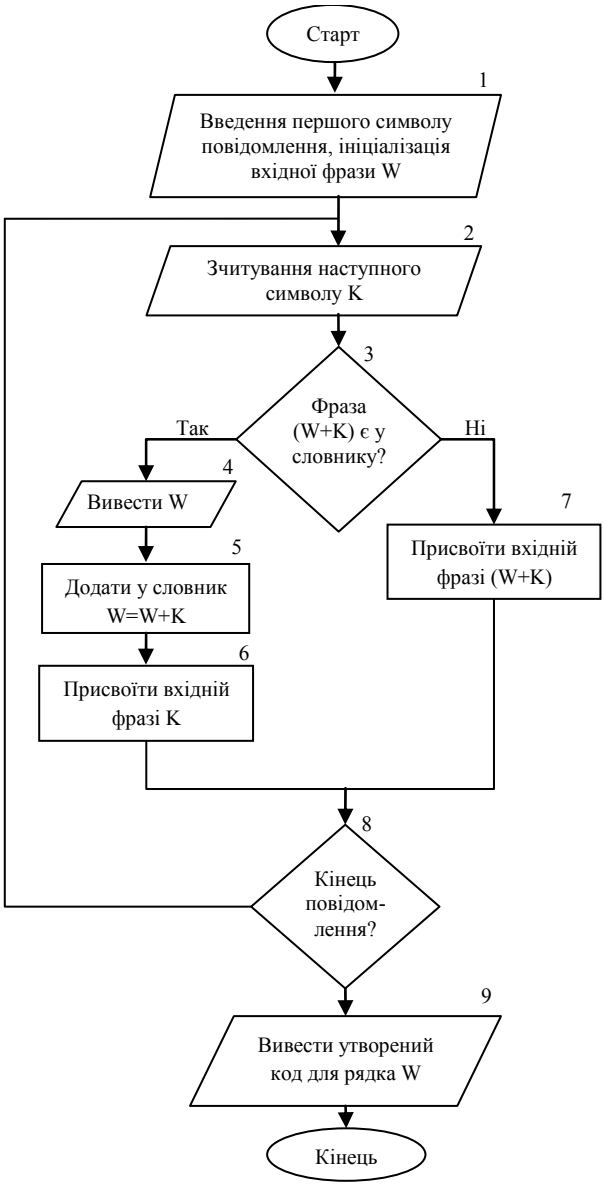


Рис. 1. Алгоритм виконання стиску повідомлень за методом LZW

У таблиці 1 наведено приклад стиску послідовності QWEQWEQQWWEEWQWEQWE символів зі словником, який містить 512 символів. Основною особливістю є те, що словник формується шляхом розширення таблиці ASCII додаванням необхідної кількості бітів. Якщо словник містить 512 символів, то додаватись буде 1 біт, якщо 1024 – то 2, 2048 – 3 і т.д. Оскільки словник в наведеному прикладі містить 512 символів, то для заданої послідовності біт «0» буде додаватись, якщо символ кодується з таблиці ASCII, а «1» – якщо новий символ є розширенням її.

Для порівняння визначимо довжину повідомлення до стиску $l_{\text{пов.}} = N_{In} \cdot l_{ASCII}$ та після стиску $l_{LZW} = N_{Out} \cdot l_{ASCII+}$, де $l_{\text{пов.}}$, l_{LZW} – довжина повідомлення до стиску та після відповідно, N_{In} – кількість символів на вході кодера, N_{Out} – кількість символів на виході кодера, l_{ASCII} – довжина двійкової комбінації символу згідно таблиці ASCII ($l_{ASCII} = 8$ біт), l_{ASCII+} – довжина двійкової комбінації символу

згідно розширеної таблиці (словника, що створений під час кодування методом LZW) ASCII+ ($l_{ASCII+} = 9$ біт). Отже $l_{\text{пов.}} = 19 \cdot 8 = 152$ біт, $l_{LZW} = 11 \cdot 9 = 99$ біт.

Таблиця 1

Результати стиску повідомлення методом LZW

Вхідне повідомлення	Символ з таблиці ASCII		Рядок символів, який порівнюємо з символами у словнику	Чи є співпадіння з символа-ми у словнику	Словник	Вихідні символи	Символ з таблиці ASCII+	
	Порядковий номер	Двійкове представлення символів					Порядковий номер	Двійкове представлення символів
Q	81	01010001						
W	87	01010111	QW	–	QW=256	Q	81	001010001
E	69	01000101	WE	–	WE=257	W	87	001010111
Q	81	01010001	EQ	–	EQ=258	E	69	001000101
W	87	01010111	QW	+ (256)				
E	69	01000101	QWE	–	QWE=259	QW	256	100000000
Q	81	01010001	EQ	+ (258)				
Q	81	01010001	EQQ	–	EQQ=260	EQ	258	100000010
W	87	01010111	QW	+ (256)				
W	87	01010111	QWW	–	QWW=261	QW	256	100000000
E	69	01000101	WE	+ (257)				
E	69	01000101	WEE	–	WEE=262	WE	257	100000001
W	87	01010111	EW	–	EW=263	E	69	001000101
Q	81	01010001	WQ	–	WQ=264	W	87	001010111
W	87	01010111	QW	+ (256)				
E	69	01000101	QWE	+ (259)				
Q	81	01010001	QWEQ	–	QWEQ=265	QWE	259	100000011
W	87	01010111	QW	+ (256)				
E	69	01000101	QWE	+ (259)		QWE	259	100000011

Таким чином, використовуючи метод стиску LZW вхідне повідомлення стало коротшим на 53 біт, а це майже 35%. Чим вхідне повідомлення довше та у ньому більше однакових послідовностей символів, тим ці цифри можуть сягати більших значень.

Висновки. Існують 3 напрямки досліджень в даній області: підвищення ефективності стиску, прискорення роботи алгоритму і здійснення стиску на підставі нової системи контекстів. Зараз кращі схеми досягають стиску в 2,3-2,5 бітів/символ для англійського тексту. Показник іноді може бути трохи поліпшений шляхом використання великих обсягів пам'яті.

Одним напрямком для досліджень є підлаштування схем стиску до вітчизняних мов. Сьогоднішні системи працюють повністю на лексичному рівні. Використання великих словників з синтаксичною і семантичною інформацією може дозволити машинам отримати перевагу від наявної в тексті високорівневої зв'язності. Однак необхідно мати на увазі, що дуже велика кількість слів звичайного англійського тексту в звичайному англійському словнику може бути не знайдена. Більшість словників не містять імен людей, назв місць, інститутів, торгових марок і т.д., хоча вони становлять основну частину майже всіх документів. Тому спеціальні алгоритми стиску, взяті в розрахунку на лінгвістичну інформацію вищого рівня, будуть безсумнівно залежати від системної сфери. Ймовірно, що пошуки методів поліпшення характеристик стиску в даному напрямку будуть об'єднуватися з дослідженнями в області контекстуального аналізу з таких проблем як витяг ключових слів і автоматичне абстрагування.

Другий підхід діаметрально протилежний описаному вище наукомісткому напрямку, і полягає в підтримці повної адаптивності системи і пошуку поліпшень в наявних алгоритмах. Необхідні кращі шляхи організації контекстів і словників. Іншою темою, яка варта уваги, для досліджень є методи виділення кодів уходів в частково відповідних контекстуальних моделях.

Пошуки більш швидких алгоритмів, які сильно впливають на розвиток методів стиску текстів, будуть безсумнівно продовжені в майбутньому. Постійний компроміс між вартостями пам'яті і обчислень стимулюватиме подальшу роботу над більш складними системами даних, які вимагають великих обсягів пам'яті, але прискорюють доступ до інформації, що зберігається. Буде розвиватися апаратура, наприклад, дослідники експериментують з арифметичним кодуванням на мікросхемі, тоді як Гонзалес-Сміт і Сторер розробили для методу стиску Лемпеля-Зіва паралельні алгоритми пошуку. Загалом, збільшення варіантів апаратних реалізацій буде стимулювати і урізноманітнювати дослідження щодо поліпшення алгоритмів, які використовують їх.

Ще однією сферою застосування є шифрування і захист даних. Стиск надає збереженим і переданим повідомленням деяку ступінь секретності. По-перше, він захищає їх від випадкового спостерігача. По-друге, за допомогою видалення надмірності він не дає можливості криптоаналітику встановити властивий природній мові статистичний порядок. По-третє, що найважливіше, модель діє як дуже великий ключ, без якого розшифрування неможливе. Застосування адаптивної моделі означає, що ключ залежить від всього

тексту, переданого системі кодування/декодування під час її ініціалізації. Також в якості ключа може бути використаний деякий префікс стиснених даних, що визначає модель для подальшого декодування.

Література

1. Шульгин В. И. Основы теории передачи информации: Ч.I. Экономное кодирование : учебное пособие / Виталий Иванович Шульгин. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 102 с.

2. Основи теорії інформації та кодування : підручник / І. В. Кузьмін, І. В. Троцишин, А. І. Кузьмін, В. О. Кедрус, В. Р. Любчик. – 3-є вид., переробл. та доповн. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – 373 с.

3. Теорія інформації та кодування : підручник / В. І. Барсов, В. А. Краснобаєв, З. В. Барсова, О. І. Тиртишніков, І. В. Авдєєв ; ред. : В. І. Барсов ; МОНМС України, Укр. інж.-пед. акад., Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава, 2011. – 321 с.

4. Данченков Я. В. Теорія інформації : навч. посіб. / Я. В. Данченков ; Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. – Рівне : НУВГП, 2012. – 111 с.

5. Цымбал В.П. Теория информации и кодирование : учебник / Цымбал В.П. – 4-е изд., перераб. и доп. – К. : Вища школа, 1992. – 263 с.

6. Кохманюк Д. Сжатие данных: как это делается / Д. Кохманюк // Index Pro. – 1992. – № 1. – С. 18–29.

7. Жураковский Ю.П. Теорія інформації та кодування / Ю.П. Жураковский, В.П. Полоторак. – К. : Вища школа, 2001. – 255 с.

References

1. Shulhyn V. Y. Osnovy teoryy peredachy ynformatsyy: Ch.I. Ekonomnoe kodyrovanye : uchebnoe posobye / Vytalyi Yvanovych Shulhyn. – Kharkov : Nats. aerokosm. un-t «Khark. avyats. yn-t», 2003. – 102 s.

2. Osnovy teorii informatsii ta koduvannia : pidruchnyk / I. V. Kuzmin, I. V. Trotsyshyn, A. I. Kuzmin, V. O. Kedrus, V. R. Liubchyk. – 3-ye vyd., pererobl. ta dopovn. – Khmelnytskyi : KhNU, 2009. – 373 c.

3. Teoriia informatsii ta koduvannia : pidruchnyk / V. I. Barsov, V. A. Krasnobaiev, Z. V. Barsova, O. I. Tyrtyshnikov, I. V. Avdieiev ; red. : V. I. Barsov ; MONMS Ukrainy, Ukr. inzh.-ped. akad., Poltav. nats. tekhn. un-t im. Yu. Kondratiuka. – Poltava, 2011. – 321 c.

4. Danchenkov Ya. V. Teoriia informatsii : navch. posib. / Ya. V. Danchenkov ; Nats. un-t vod. hosp-va ta pryrodokorystuvannia. – Rivne : NUVHP, 2012. – 111 c.

5. Tsymbal V.P. Teoryia ynformatsyy y kodyrovanye : uchebnyk / Tsymbal V.P. – 4-e yzd., pererab. y dop. – K. : Vyshcha shkola, 1992. – 263 s.

6. Kokhmaniuk D. Szhatye dannykh: kak эto delaetsia / D. Kokhmaniuk // Index Pro. – 1992. – # 1. – S. 18–29.

7. Zhurakovskyi Yu.P. Teoriia informatsii ta koduvannia / Yu.P. Zhurakovskyi, V.P. Polotorak. – K. : Vyshcha shkola, 2001. – 255 s.

Рецензія/Peer review : 13.06.2017 р. Надрукована/Printed :09.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

УДК 637.073.051

Н. М. ЗАЩЕПКІНА, О. А. НАКОНЕЧНИЙ, Д. В. ЖИЛЯКОВ, М. І. ХАРЧЕНКО
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В БЛИЖНІЙ ІНФРАЧЕРВОНІЙ ОБЛАСТІ СПЕКТРУ

Метою роботи є огляд та удосконалення засобів контролю оптичних характеристик зерна пшениці. Об`єкт дослідження – процес визначення оптичних характеристики зерна пшениці. схемні рішення для включення освітлювача та первинного перетворювача для визначення оптичних характеристик зерна пшениці. В процесі роботи було проведено аналіз літературних джерел пов'язаних із оглядом конструктивних особливостей аналізаторів спектру в ближній інфрачервоній області, визначено предмет, об'єкт дослідження, зроблено аналіз існуючих методів та засобів визначення оптичних характеристик зерна пшениці. Практична частина містить розробку та апробацію схемних рішень для забезпечення включення джерела випромінювання та фотодетектора для визначення оптичних характеристик зерна пшениці. Розроблено схему керування масивом світлодіодів джерела освітлення, та визначено її параметри функціонування. Розроблено схему керування фотоприймачем та методику вимірювання показників відгуків первинного перетворювача в аналоговій формі, для визначення оптичних характеристик зерна пшениці.

Ключові слова: БІЧ-аналізатор, вимірювання спектру, монохроматор, первинний перетворювач, світлодіодний масив, джерело освітлення, фотодіодний детектор, фотодіодна лінійка, аналоговий сигнал, градуювальна модель.

N. M. ZASHCHEPKINA, O. A. NAKONECHNYJ, D. V. ZHYLJAKOV, M. I. HARCHENKO
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

IMPROVEMENT OF DETERMINATION OPTICAL CHARACTERISTICS WHEAT GRAINS WITH ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE NEAR INFRARED REGION OF THE SPECTRUM

Most of the models of spectrum analyzers working in the near-infrared region contain, as a source of radiation, halogen or nitrate lamps. This allows us to obtain a continuous and linear spectrum of radiation in the range of 0.8-2.5 microns. But, at the same time, such circuit solutions require massive autonomous power supplies, and can be limited to connecting to centralized power networks. The disadvantage of detectors which are using in detecting systems, can be considered an effect on their work temperature, so in most systems with their use, detectors are thermally stabilized. As part of the work, the replacement of the incandescent lamp in the typical scheme of the spectral analyzer "Infrasan-105", which measures the grain reflection spectrum of wheat, for the LED array (Honeywall SEP8705-003) on the basis of the household light-emitting diode lamp Ecola GU10 4200K, and the replacement of the standard photo detector of the device, (photoconductive element of lead selenide (PbSe)) with a monolithic photodiode P101 with a built-in operating amplifier from Texas Instruments. This solution eliminates most of the shortcomings of the incandescent lamps as a source of radiation, and with the correct selection of LEDs according to the energy characteristics and linearity of the spectral curve, it allows to reduce the price of the sample of the spectral luminance registration device, needs lower electricity consumption and has better characteristics of the duration of work.

Key words: spectral analyzer, spectrum measurement, monochromator, primary converter, LED array, light source, photodiode detector, photodiode line, analog signal, calibration model.

Вступ

Сучасні ринкові умови розвитку сільського господарства вимагають від підприємств, що входять у виробничий цикл переробки зерна, оптимізації процесу приймання і розподілу сировини всередині підприємства, мінімізації можливих витрат, пов'язаних з простоєм машин і агрегатів, а також прийманням неякісної продукції. Дуже важливим є аспект збереження якості зерна і недопущення його змішування. Для вирішення цих завдань необхідне введення контролю якості всього потоку продукції, що призводить до необхідності багаторазового збільшення кількості проведених аналізів.

Для здійснення такого контролю потрібно визначити кількісний та якісний склад речовин. При використанні класичних трудомістких і тривалих методів аналізу, контроль вхідного потоку зернової сировини на елеваторах і хлібоприймальних підприємствах перетворюється в важко реалізоване завдання [3]. Для цього традиційно використовуються стандартизовані методи, які базуються на проведенні хімічних реакцій, що призводить до руйнування зразка. Операції виконуються вручну, потребують ретельної підготовки проб і потребують великої кількості часу для проведення аналізу. Актуальним є удосконалення експрес-контролю, заснованого на сучасних і швидких методах аналізу [5].

Таким методом, що постійно розвивається, є ближня інфрачервона спектроскопія (БІЧ-спектроскопія). Вимірювальні прилади, робота яких заснована на цьому методі, дозволяють проводити велику кількість аналізів (від декількох десятків до сотень в день) при мінімумі операцій підготовки проб. Спектроскопія у ближній інфрачервоній області (БІЧ-області) являє собою сучасний інструментальний метод кількісного та якісного аналізу різних об'єктів. Область спектру, яка використовується, безпечна як для оператора, так і для об'єкту аналізу, що при відповідному технічному забезпеченні дозволяє досліджувати різні сільськогосподарські продукти без нанесення їм будь-якої шкоди [11].

За кордоном аналізатори, які працюють в ближньому інфрачервоному спектрі (БІЧ-аналізатори) використовуються досить широко, в першу чергу для контролю якості зернових культур. Результати аналізів, отримані на цих приладах, використовуються при операціях первинної прийомки, зберігання та сортування зерна на елеваторах, а також при торгових операціях. У вітчизняних реаліях масштаби впровадження БІЧ-аналізаторів та перетворювачів не відповідають сучасним потребам ринку

сільськогосподарської продукції, і до цього часу значна частина виробників зерна та елеваторів не оснащені такою технікою.

Таким чином, розробка та удосконалення засобів аналізу зернових культур за допомогою БІЧ-спектроскопії є доцільним, актуальним і потребує подальших досліджень.

Експериментальна частина

Відомо, що світло має двоїсту природу – хвильову і корпускулярну, і для його опису використовуються характеристики двох видів: хвильові та квантові. Одні фізичні явища, викликані взаємодією світла і матерії, можуть бути описані за допомогою хвильової природи світла, інші – тільки на основі нової теорії. Видиме світло є прикладом електромагнітного випромінювання. Як приклад, можна назвати: рентгенівське, ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання. Всі ці види випромінювання можна реєструвати в вигляді електромагнітних хвиль, що поширюються зі швидкістю світла і відрізняються тільки частотою, і відповідно – довжиною хвиль, тобто спектральними характеристиками [7].

Метою роботи є огляд та удосконалення оптичних методів та засобів контролю якості зерна пшениці із застосуванням електромагнітного випромінювання в ближній інфрачервоній області спектру.

Об`єктом дослідження є процес визначення оптичних характеристики зерна пшениці.

Предмет дослідження – схемні рішення для включення освітлювача та первинного перетворювача для визначення оптичних характеристик зерна пшениці.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено наступні задачі:

– аналіз літературних джерел пов’язаних із оглядом конструктивних особливостей БІЧ-аналізаторів;

– огляд існуючих методів визначення оптичних характеристик зерна пшениці;

– вибір схемних рішень для забезпечення розробки фотодіодного перетворювача та світлодіодного джерела випромінювання;

– розробка конструкції перетворювача для визначення оптичних характеристик зерна пшениці та схеми включення світлодіодного масиву джерела освітлення.

Більшість спектроскопічних методів визначають взаємодію між електромагнітним випромінюванням і матерією. Спектроскопія, за визначенням, займається аналізом характеристичних відгуків атомів, іонів, радикалів і молекул на основі реєстрації і розшифровки їх спектрів, отриманих за допомогою різних вимірювальних методик. Спектроскопічні прилади складаються, як правило, з трьох основних вузлів:

1) джерела випромінювання;

2) пристрою для спектрального розкладання;

3) детектора для вимірювання випромінювання.

Практична спектроскопія розвивається в двох напрямках і ділиться на атомну та молекулярну.

При атомної спектроскопії мова йде про якісне і кількісне визначення елементів в різних речовинах і областях концентрацій. Сюди відносяться, наприклад, методи атомної абсорбції, атомної емісії та рентгенівської флуоресценції. Методи молекулярної спектроскопії на основі ультрафіолетової (УФ), видимої, та інфрачервоної (ІЧ) областей спектру, комбінаційного розсіювання та ядерного магнітного резонансу (ЯМР) дозволяють зробити висновок про зв'язки і структуру молекул. До загального поняття «спектроскопія» відносяться також методи мас-спектрометрії та електронної спектрометрії [9].

За допомогою спектроскопічних методів вдається вирішувати такі завдання:

1) знаходити та ідентифікувати сировинні ресурси;

2) діагностувати нові вироби та технології;

3) проектувати та оптимізувати виробничі процеси;

4) забезпечувати необхідну якість вхідної сировини.

За допомогою спектроскопії можна діагностувати як якісні, так і кількісні результати. Але в ідеальному варіанті, речовини при цьому повинні бути абсолютно чистими, бо в разі їх суміші відбувається накладання спектрів поглинання чи відбиття кожного з окремих компонентів. Якщо ми маємо справу з невідомою сумішшю речовин, то, особливо, для молекулярної спектроскопії потрібний попередній поділ цієї суміші на окремі субстанції – наприклад, із застосуванням хроматографії. На відміну від цього, атомна спектроскопія завдяки своїм особливостям має надзвичайно високу селективність, тому при цьому поділ на складові не потрібен, якщо не виникають будь-які перехресні завади [4, 15].

Якісний аналіз. Спектр поглинання, тобто графічне відображення перехідних процесів в речовині відповідно до довжини хвилі поглинутого або відбитого світла, дає інформацію щодо кількісного та якісного складу речовини. Різні речовини, описані через формули хімічних сполук, розрізняються своїми структурами – атомною, просторовою та електронною. Тому кожна речовина по-своєму реагує на електронне, коливальне або обертальне збудження, формуючи характерний тільки для неї спектральний відгук. Таким чином, у кожній речовині характеристичний спектр поглинання чи відбиття є індивідуальним, як і відбитки пальців у людини [10].

У разі суміші речовин, отримують сумарний спектр всіх її компонентів. З математичної точки зору тут виникає проблема одного рівняння з n невідомими (одного спектра з n речовинами). Якщо області поглинання характеризують складну суміш (накладаються один на одного), то сумарний спектр не дозволяє зробити достовірний висновок про вид і кількість окремих компонентів. У випадку, якщо області поглинання в сумарному спектрі не будуть перекриватися – окремі речовини можуть бути ідентифіковані.

Кількісний аналіз. В основі кількісного аналізу лежить закон Ламберта-Бера, тобто визначення

оптичної щільності E при тій довжині хвилі, при якій досліджувана речовина поглинає світло. Закон Ламберта стверджує, що кількість світла, яке поглинається речовиною, не залежить від інтенсивності джерела випромінювання, а є пропорційною числу поглинаючих молекул. Тому [13]:

$$E = log\left(\frac{I_O}{I}\right) = ecd \ , \tag{1}$$

де E – характеризує, як оптичну щільність, так і логарифм частки від розподілу інтенсивностей падаючого I_0 і відбитого I світла (не має розмірності);

d – величина, що показує довжину шляху світла, що пройшло через пробу, тобто товщину шару;

e – стала матеріалу, якщо використовується концентрація c (в моль/л) при товщина шару d (см), позначається як молярний коефіцієнт поглинання, або молярний показник поглинання з розмірністю см/мілімоль.

Інфрачервоні (ІЧ) промені, які використовуються в БІЧ-спектроскопії, являють собою електромагнітне випромінювання. Однією з основних характеристик електромагнітного випромінювання, як і будь-якого коливального руху, є довжина хвилі, або пов'язана з нею, через швидкість руху хвилі, частота [10].

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \ , \tag{2}$$

де ν – частота, Гц;

c – швидкість світла, м/с;

λ – довжина хвилі світла, м.

В ближній інфрачервоній спектроскопії зазвичай використовують хвильові числа σ, зворотні довжині хвилі, які вимірюються в см$^{-1}$. Хвильові числа показують, скільки довжин хвиль вкладається в 1 см ($\sigma \approx 10000/\lambda$, де λ вимірюється в мкм).

Під спектром розуміють розподіл електромагнітного випромінювання по довжинах хвиль. Розрізняють спектри випромінювання (емісійні) і поглинання (абсорбційні). Сукупність довжин хвиль (частот), що містяться у випромінюванні будь-якої речовини, називається емісійним спектром, а спектр що поглинаються даною речовиною – абсорбційним спектром. Крім двох найбільш поширених типів спектрів існують також характеристичні спектри розсіювання. [1]

Подання випромінювання у вигляді спектра несе в собі вагому інформацію про хімічний склад речовини, її агрегатний стан, температуру, фізичні і хімічні процеси, що протікають в ній. Ця інформація закодована у вимірювальних параметрах – питомій потужності випромінювання в окремих ділянках спектра, а також в ширині та формі спектральних ліній.

ІЧ-область, зазвичай, розглядають, починаючи з червоного краю видимого спектру, приблизно з 14000 см$^{-1}$ (або 0,7 мкм). До БІЧ-області спектра відносять діапазон випромінювання від 14000 до 3600 см$^{-1}$ (від 0,7 до 2,8 мкм). Так звана, фундаментальна область, лежить в межах від 3600 до 300 см$^{-1}$. Дальню ІЧ-область вважають від 300 до 20 см$^{-1}$, але для аналізу вона практично не використовується [10].

При взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, частина енергії поглинається молекулами, що її утворюють, вільними атомами або іонами в залежності від стану або складу речовини. Методи аналітичної хімії, що аналізують спектри, називаються спектральними методами або спектроскопією. Вони класифікуються як атомні або молекулярні в залежності від того, як взаємодіє із збуджуючим випромінюванням досліджувана речовина: емісійні або абсорбційні відповідно до характеру спектрів.

У спектроскопії у ближній інфрачервоній області, незалежно від того, отримують спектри пропускання або відбиття, діагностують характеристичне випромінювання молекулами речовини, що досліджується. Цей метод можна визначити як молекулярну абсорбційну спектроскопію [2, 8].

Фундаментальні смуги поглинання коливальних спектрів молекул речовин в твердому і рідкому стані знаходяться в середній інфрачервоній області (2,5-50 мкм). У ближній інфрачервоній області знаходяться обертони і складові частоти, обумовлені зв'язками атома водню з атомами інших хімічних елементів. Частота коливання і, відповідно, довжина хвилі поглинання та відбиття залежать від того, з яким атомом пов'язаний атом водню і в яких структурах знаходиться.

Отримання спектрів в ближній інфрачервоній області значно простіше в технічному відношенні, ніж у середній, що істотно зменшує вартість аналізу. Джерелом випромінювання може бути звичайна лампа розжарювання або світлодіод з відповідним характеристичним спектром. Причому, для БІЧ-діапазону прозорим є не тільки кварц, але і скло, що полегшує завдання виготовлення оптичних деталей і кювет. В БІЧ-області також можна отримувати спектри водних розчинів, суспензій і емульсій, що ускладнено через сильне поглинання води в середній інфрачервоної області. Це істотно полегшує, проведення аналізів не тільки твердих багатокомпонентних речовин (зернових культур), а і алкогольної продукції, молока, йогуртів та ін. У табл. 1 наведені смуги поглинання деяких речовин в БІЧ-області спектру і зазначено характер їх коливань [6, 13].

Процес спектрального аналізу кількісного та якісного складу речовин в БІЧ-області полягає у виконанні простих операцій і, зазвичай, зводиться до заповнення кювети досліджуваним матеріалом, її розміщення у вимірювальній камері приладу та отримання результатів. За короткий проміжок часу спектрометр реєструє спектри, виконуючи серію вимірювань. Пов'язаний з БІЧ-аналізатором комп'ютер проводить перетворення отриманих сигналів та обробляє результати кількох показників одночасно, що є

метою комплексного аналізу. Комп'ютер порівнює отриману спектральну інформацію з даними, що зберігаються в бібліотеці спектрів різних речовин, і визначає відповідність даного зразка при заданому рівні ймовірності, здійснює ідентифікацію або якісний аналіз зразка.

Таблиця 1

Приклади смуг поглинання речовин в БІЧ-області спектру

Довжина хвилі, нм	Характер коливань	Структура
760	О-Н валентний (вал.) третій обертон	H_20
874	С-Н вал. третій обертон	Бензол
990	О-Н вал. третій обертон	Крохмаль
1143	С-Н вал другий обертон	Ароматичні сполуки
1410	О-Н вал. перший обертон	R-OH, жир
1940	О-Н вал. $^{+}$О-Н деформаційний (деф.)	H_2O
2060	N-H деф. другий обертон або N-H деф. $^{+}$N-H вал.	Білок
2132	N-H вал. $^{+}$C=O вал.	Амінокислоти
2488	С-Н вал., $^{+}$С-С вал.	Целюлоза

Методи обробки спектральних даних, як і методи градуювання інфрачервоних аналізаторів, досить складні і трудомісткі внаслідок характерної для БІЧ-області слабо диференційованої спектральної картини, що являє собою результат взаємного перекриття численних смуг поглинання чи відбиття. Це ускладнює проведення аналізу, тому дана область спектру довго не привертала особливої уваги науковців. В значно більшій мірі вивчена більш довгохвильова частина інфрачервоного діапазону, де лежать фундаментальні частоти коливання молекул. У той же час для практичного аналітичного застосування БІЧ-область має ряд переваг. Перш за все, слід вказати на велику проникаючу здатність випромінювання в цій області. На відміну від фундаментальної, в БІЧ-області практично прозорий кварц і навіть скло, що полегшує проблему виготовлення кювет і деталей оптики. В БІЧ-області можливе проведення вимірювань при значній товщині об'єкту, в той час, як в класичній інфрачервоній спектроскопії для вимірювання коефіцієнтів поглинання використовують тільки дуже тонкі плівки твердого матеріалу [6].

Спектральні прилади для проведення аналізу в ближній інфрачервоній області вельми різноманітні. Як приклад: вимірювальні засоби з фіксованими довжинами хвиль (аналізатори InfraAlyser фірми «Technicon/ Dickey John», Inframatic-9200 фірми «Perten Instruments», InfraAlyser-360 фірми «Bran & Luebbe»); скануючі фільтрові спектрометри (аналізатор GQA фірми «Neotec», аналізатор моделі 4250 фірми «NIRSistems»); прилади з монохроматорами на основі дифракційної решітки (аналізатор Infrapid-61 фірми «LaborMIM», аналізатор моделі 4500 фірми «NIRSistems», аналізатор Infratec-1255 фірми «Tecator», аналізатор InfraAlyser-500 фірми «Technicon», аналізатор OmegaAnalyzer фірми «Bruins Instruments», аналізатор InfraAlyzer Grain фірми «Bran & Luebbe») [14].

У системах детектування аналізаторів в основному застосовуються три типи детекторів: кремнієвий напівпровідниковий (Si), фоторезистивний із сульфіду свинцю (PbS) і фоторезистивний із селеніду свинцю (PbSe), а також широкий спектр фотодіодів та фотодіодних матриць (лінійок) [12].

Найбільш чутливим з них є кремнієвий напівпровідниковий детектор. Він використовується в короткохвильовій інфрачервоній області в приладах, що вимірюють спектри пропускання зразків. Для вимірювання дифузного відбиття частіше використовується детектор із сульфіду свинцю. Недоліком цього детектора можна вважати вплив на його роботу температури та необхідність термостабілізації.

Загальну будова БІЧ-аналізаторів, незалежно від принципу вимірювання і технічних пристроїв, можна представити наступним чином (рис. 1):

Кожен з методів вимірювання спектру накладає свої вимоги до спектрального діапазону та системи детектування, маючи власні переваги та недоліки. Таким чином, важливу роль грає не тільки шлях проходження оптичного випромінювання в системі, але і його енергетичні характеристики, та наявність додаткових викривлень в оптичній системі спричинених абераціями, недостатнім юстируванням оптичних елементів та сторонніми впливами (вібрація, удари, різкі зміни положення приладу в просторі).

Для вимірювання дифузного відбиття найчастіше використовується спектральний діапазон от 0,8 до 2,5 мкм (від 12000 до 4000 см$^{-1}$). Це обумовлено, в першу чергу, тим, що поглинання речовиною інфрачервоного випромінювання збільшується зі збільшенням довжини хвилі.

До переваг цього методу можна віднести більш явну спектральну інформацію, наприклад, смуги білків, жирів, зв’язаної вологи в зернах злакових в цьому діапазоні сильніше виражені, ніж в більш короткохвильовій області. Це дозволяє використовувати фільтрові аналізатори, що діагностують від 4 до 20-30 точок в спектрі.

Використовуючи дане конструктивне рішення, в залежності від поставленої задачі і агрегатного стану зразка, можна вимірювати як спектр пропускання, так і спектр дифузного відбиття, причому як мінімум двома способами (рис. 2) [6].

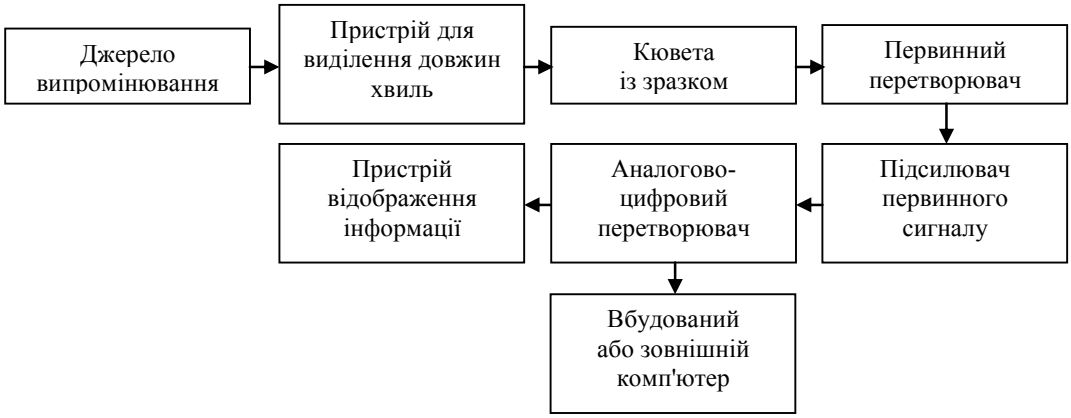


Рис. 1. Загальна схема роботи аналізаторів ближнього ІЧ спектру

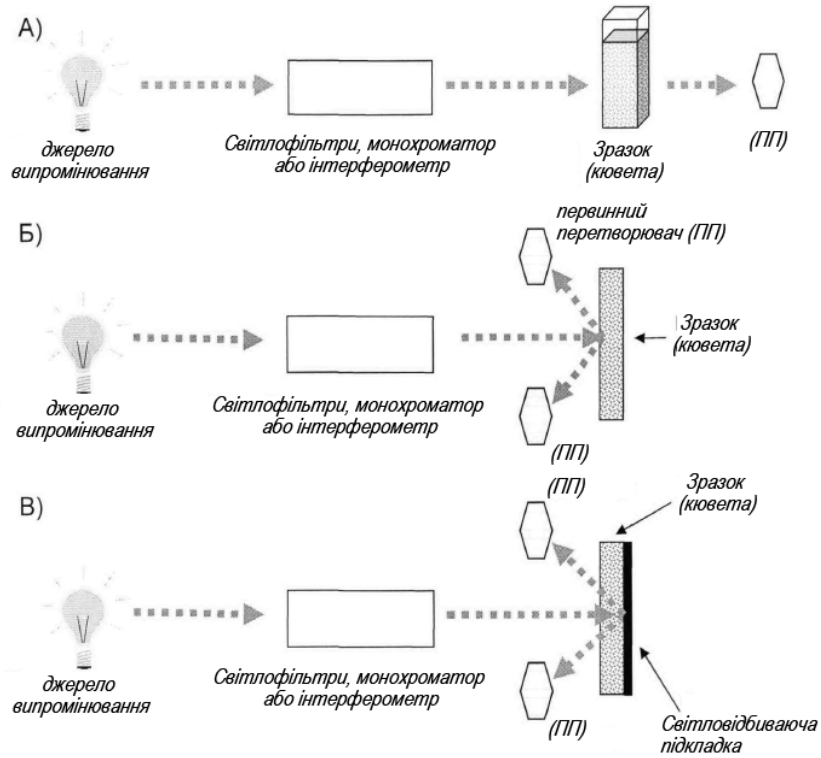


Рис. 2. Основні методи вимірювання зразків: А - пропускання, Б - дифузне відбиття, В - комбінований (дифузне відбиття + пропускання) [6]

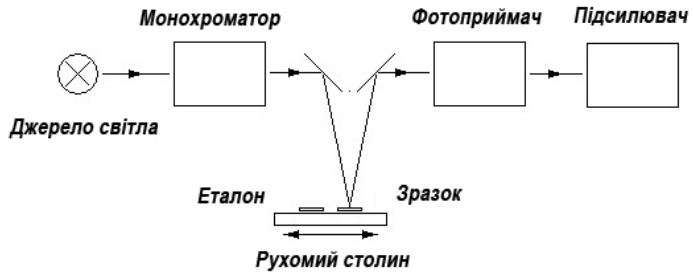


Рис. 3. Блок-схема однопроменевого спектрофотометра з фокусуванням на зразку вузької області спектра після монохроматора і надалі вимірюванням рівня сигналу

В зв'язку з тим, що основою для наших дослідів був макет на базі БІЧ спектрофотометра «Інфраскан-105», який має конструктивну особливість розміщення монохроматора перед досліджуваним зразком, для розробки перетворювача була вибрана схема інтеграції в спектрофотометр, що потребувала мінімальних змін конструкції засобу вимірювань, із збереженням характеристик оптичної системи приладу (рис.3).

Принцип дії аналізатора заснований на вимірюванні відношення двох світлових потоків: потоку, дифузно відбитого досліджуваним зразком, і потоку, дифузно відбитого контрольним зразком (еталоном). Конструктивні особливості приладу показані на рис. 3.

У монохроматичний потік по черзі вводяться досліджуваний та контрольний зразки. Фотоприймач

формує у вимірювальному колі напругу, пропорційну кількості світла, дифузно розсіяного зразком. Вимірювання темнового струму фотоприймача здійснюється при відключеному джерелі світла. Коефіцієнт дифузного відбиття досліджуваного зразка *R* розраховується за формулою:

$$R = \frac{\left(U_e - U_ф\right)}{\left(U_з - U_ф\right)}, \quad (3)$$

де U_e – напруга, пропорційна світловому потоку відбитому еталоном;

$U_з$ – напруга, пропорційна світловому потоку відбитому зразком;

$U_ф$ – напруга, пропорційне темновому струму фотоприймача.

Виміряне значення коефіцієнта дифузного відбиття визначено за допомогою потенціометра, осцилографа (при безпосередньому вимірі опорних струмів та напруг в ключових точках електричної схеми включення фотоприймача) або у випадку переведення сигналу відгуку в дискретну форму – за допомогою штатного АЦП аналізатору «Інфраскан-105», відображення результатів на індикаторній панелі приладу та подальшого аналізу за допомогою підключення аналізатора до ЕОМ.

Експериментальна установка побудована на базі спектрофотометра «Інфраскан-105», у якому у відсік приймача випромінювання встановлено фотодіодний перетворювач. На лицьову панель спектрофотометра виведені потенціометр, також стрілочний індикатор напруги. Реакція фотодіода реєструється універсальним вимірювальним приладом типу В7-21.

Мета розробки – заміна ксенонової лампи розжарення матрицею світлодіодів (Honeywall SEP8705-003) на базі побутової світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K, а також заміна штатного фотодетектора приладу (фоторезистивний елемент із селеніду свинцю (PbSe)) монолітним фотодіодом P101 із вбудованим операційним підсилювачем фірми Texas Instruments. Таке рішення виключає більшість недоліків ламп розжарення у якості джерел випромінювання, та при правильному підборі світлодіодів по енергетичним характеристикам, лінійності спектральної кривої дає змогу здешевити кінцевий зразок засобу реєстрації спектральної яскравості. Дане конструктивне рішення потребує значно менших затрат електроенергії, має кращі характеристики напрацювання на відмову джерела випромінювання, та в меншій мірі виключає можливість фізичного пошкодження випромінювача.

В той же час використання фотодіоду (у подальшому – лінійки фотодіодів) із вбудованим операційним підсилювачем, дозволяє уникнути необхідності використання фотодетекторів (фоторезистивних елементів) із системою охолодження, а також дозволяє реєструвати дуже малу інтенсивність випромінювання.

Так як, фотодіоди являються малоінерційними приймачами випромінювання (їх інерційність не залежить від рівня збудження, тобто від потужності потоку випромінювання), відповідно вони мають низький рівень шуму і високу чутливість, що дозволяє використовувати їх для вимірювання дуже малих потоків випромінювання ($P_{min} \approx 10^{-12}$ Вт).

Таким чином, основним методом розрахунку коефіцієнта заломлення на даному етапі розробки перетворювача є застосування аналогової електричної схеми включення, із використанням простого трансімпедансного підсилювача та подальшим визначенням різницевих напруг на виході підсилювача фотодіоду.

При виборі джерела випромінювання керуємося наступними положеннями:

1) Наявний у наших дослідженнях макет на базі БІЧ аналізатоу «Інфраскан-105» містить стабілізоване джерело живлення в якому наявна лінія змінного струму напругою 220 В та струмом 5 А.

2) Відсік для розміщення джерела випромінювання дозоляє провести заміну штатного освітлювача вимірювального засобу (галогенової лампи з відбивачем ІЧ-випромінювання) на освітлювач в габаритних розмірах звичайної лампи розжарювання потужністю 100 Вт.

Таким чином, було вибрано драйвер побутової світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K (що має напругу живлення змінного струму U = 220 В, при струмі 28 мА) із заміною штатних світлодіодів у матриці на інфрачервоні свтлодіоди Honeywall SEP8705-003 у кількості 15 одиниць.

Використаний в роботі світлодіод Honeywall SEP8705-003 є інфрачервоним світлодіодом із максимумом випромінювання в області 0,88 мкм, та має наступні характеристики:

Пряма напруга живлення: 1,7 В;
Зворотня напруга: 3 В при 10 мА;
Робочий прямий струм: 20 мА;
Максимальний прямий струм: 20 мА;
Спектральний максимум: 880 нм;
Вихідний світловий потік потужністю: 1130 лм/Вт.
Кут розходження променів: 15°
Максимальна потужність: 70мВт;
Робочі температури: -40°-(+85°C);

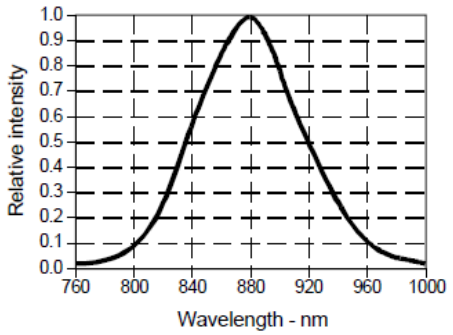


Рис. 4. характеристичний спектр випромінювання світлодіода Honeywall sep8705-003

Контролер керування світлодіодним масивом побудований на мікросхемі BP2831A, і дає на виході 100 В та 60 мА постійної напруги. Контролер зібраний на мініатюрній платі, яка цілком розміщена в цоколі, входи і виходи контролера підключені проводами мінімальної довжини.

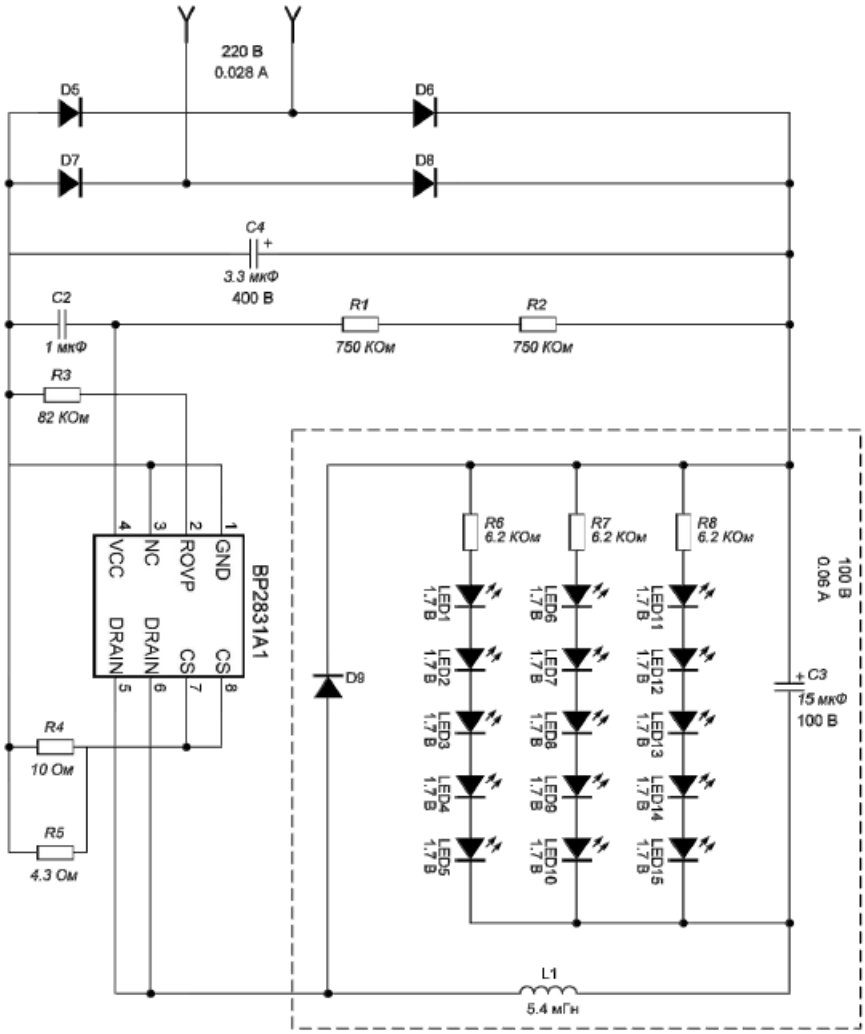


Рис. 5. Схема керування драйвером світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K із інфрачервоними світлодіодами Honeywall SEP8705-003

Для підключення масиву світлодіодів до штатного драйвера світлодіодної лампи було використано паралельно-послідовний тип підключення (3 лінії споживаною потужністю 7,5 Вт, та струмом живлення 20 мА). Так як штатний драйвер світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K має на виході напругу постійного струму U = 100 В, при струмі 60 мА), відповідно кожна лінія живлення світлодіодів при паралельному підключенні буде становити 20 мА, що цілком достатньо для послідовного включення вибраних нами світлодіодів послідовно в лінію.

Світлодіоди мають пряму напругу 1,7 В, тому падіння напруги на 5 світлодіодах буде становити 1,7·5 = 8,5 В. Потрібно скомпенсувати 100 - 8,5 = 91,5 В. Для забезпечення роботи світлодіодних лінійок було вибрано однакові обмежувальні опори R6, R7 та R8 із параметрами 6,2 КОм та потужністю 2 Вт із стандартним відхиленням від номіналу ±5% (E-24).

Враховуючи наявність в макетній установці стабілізованого штатного джерела живлення із постійною напругою на виході U = 15 В і струмом споживання I = 500 мА (для живлення фоторезистивного детектора на основі селеніду свинцю (PbSe)), для зменшення операцій по зміні конструкції електричної схеми приладу було прийнято рішення застосувати монолітний фотодіод із вбудованим підсилювачем OPT101, фірми Texas Instruments. Даний фотодіод має наступні параметри:

Фотодіодний приймач OPT101 є монолітнним фотодіодом із трансімпедансним підсилювачем на чіпі (рис. 6). Інтегрована комбінація фотодіода і підсилювача на одному чіпі усуває проблеми, що часто зустрічаються в дискретних конструкціях: стрибки струму витоку, високочастотні шуми та дозволяє отримати покращення частотних характеристик внаслідок усунення впливу паразитних ємностей. Вихідна напруга лінійно збільшується з інтенсивністю світла. Підсилювач призначений для роботи з одним або двома джерелами живлення.

В фотодіодному режимі фотодіод працює в режимі фотопровідності, забезпечуючи лінійність характеристик і низьке значення темнового струму. OPT101 працює з напругами від 2,7 В до 36 В, його

темновий струм становить всього 120 мА. Температурний діапазон роботи фотодіодного підсилювача становить від 0°С до 70°С.

Напруга живлення: від 2,7 до 36 В;
Розмір фотодіоду: 2,29 мм х2,29 мм;
Чутливість: 0,45 мкА/мкВт (650 нм);
Ширина смуги частот: 14 кГц при RF = 1 MQ;
Темновий струм: 120 мА.

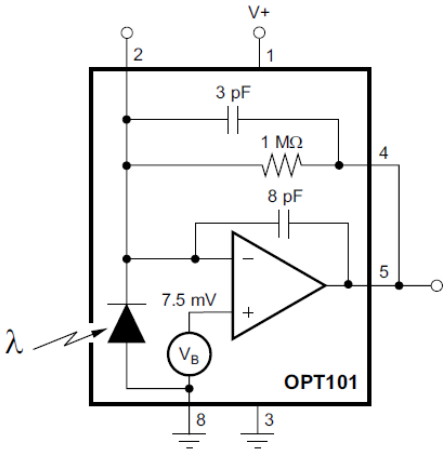


Рис. 6. Принципова схема фотодіоду із встроєним трансімпендантним підсилювачем

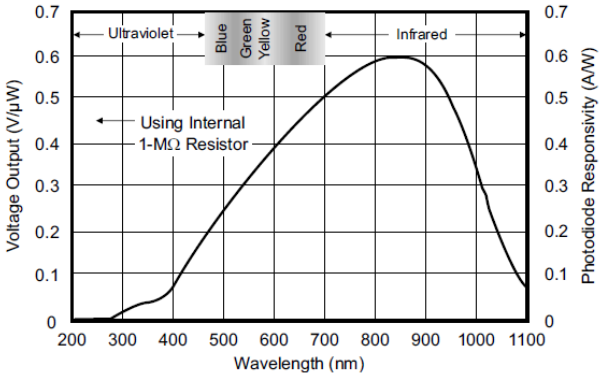


Рис. 7. Спектральна чутливість фотодіоду із встроєним трансімпендантним підсилювачем

Даний фотодіод має широку спектральну чутливість з максимумом близько 0,84 мкм, та спектральний діапазон вимірювань інтенсивності світлового потоку 0,9–1,42 мкм. Діапазон лінійності фотодіоду по спектру становить 0,41–1,08 мкм (рис. 7).

Згідно специфікації фотодіодного підсилювача, даний вимірювальний елемент дозволяє провести вимірювання інтенсивності світлового потоку як по струму так і по напрузі, при внесенні додаткових опорів у вимірювальне коло.

1. Вимірювання сили світлого потоку по струму (рис. 8,а). Таке вимірювання дає більш високу точність вимірювання та незалежність від вихідних навантажень, але при цьому не використовується повністю коефіцієнт підсилення операційного підсилювача. Для проведення вимірювань вносимо в стандартний ланцюг включення фотодіодного підсилювача навантаження $R_L = 10$ кОм, і послідовно включаємо мікроамперметр з низьким опором.

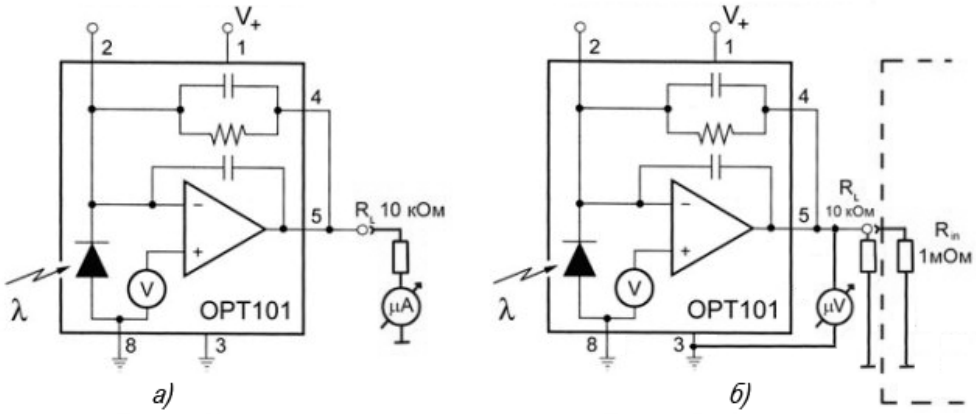


Рис. 8. Вимірювання рівня освітленості фотодіоду: а) за струмом; б) за напругою

2. Вимірювання сили світлового потоку за напругою (рис. 8,б). Так як, у штатному режимі роботи засіб вимірювань («Інфраскан-105»), на основі якого збирався макет експериментальної установки, визначає коефіцієнт дифузного відбиття досліджуваного зразка *R* по напрузі то основним режимом вимірювань у наших дослідженнях були вимірювання різницевих напруг на виході операційного підсилювача (див. вираз 3). Реакція фотодіода реєструвалася універсальним вимірювальним приладом типу В7-21.

Вимірювання проводилися на виході операційного підсилювача фотодіодного приймача OPT101 при зрівнянні відгуків сигналів вимірювальної інформації спричинених відбитим світловим потоком почергово від еталону та досліджуваного зразка. Для шунтування виходу операційного підсилювача був використаний резистор R10 номіналом 10 КОм.

Операційний підсилювач видає напругу в межах від 2,7 В (у випадку протікання темнового струму) до 8,5 В при роботі світлодіодного масиву. Отриманий діапазон напруг є достатнім для побудови калібрувальних графіків у випадку подальших вимірювань із застосуванням логометричного методу

зрівняння різницевих напруг при використанні двох вимірювальних каналів («еталон» + «зразок») із включенням вимірювальних ланок що містять фотодетектори паралельно. Таке конструктивне рішення, у майбутньому, дозволяє виключити інтегруючу сферу із оптичної схеми макету.

Вимірюючи опорні напруги на виході операційного підсилювача (згідно схем на рис. 8) може виникнути небезпека зменшення точності вимірювання, якщо вхідний опір вольтметра відрізняється від заданого значення опору навантаження (R_l = 10 кОм). Тоді режим роботи операційного підсилювача зміниться, що призведе до невідповідності з паспортними даними. Наприклад, небезпечно підключати звичайні універсальні тестери – у них може бути сильний розкид вхідних опорів. В такому випадку, для забезпечення паспортної чутливості необхідно зашунтувати вихід операційного підсилювача опором R_{in} і підключати вольтметри зі свідомо великим вхідним опором (сотні і тисячі кОм).

Висновки

В результаті аналізу інформації щодо доступності комерційних зразків наявних на ринку БІЧ-аналізаторів, можна дійти висновку, що у більшості випадків для контролю якості харчової і сільськогосподарської продукції, використовується техніка, заснована на відбивній спектроскопії. Відповідно і розроблене методичне забезпечення призначене для роботи з аналізаторами, що вимірюють спектр відбиття частіше всього в пробах розмеленого зерна.

Тому доцільним є розробка та вдосконалення перетворювачів та аналізаторів спектру здатних вимірювати спектри пропускання і відбиття цільного зерна, а також їх впровадженням у вітчизняне виробництво та стандартизація технологічних карт призначених для проведення експрес-аналізу.

2. Більшість розглянутих моделей спектрометрів, що працюють в ближній інфрачервоній області містять, у якості джерела випромінювання, галогенні або нітратні лампи. Це дозволяє отримати безперервний та лінійний спектр випромінювання в області 0,8–2,5 мкм. Але, в той же час, такі схемні рішення потребують масивних автономних джерел живлення, та можуть обмежено використовуватися без підключення до централізованих мереж енергоспоживання.

3. В даний час існує велика кількість конструктивних рішень, що використовуються в аналізаторах спектру в ближній інфрачервоній області. У системах детектування аналізаторів в основному застосовуються три типи детекторів: кремнієвий напівпровідниковий (Si), фоторезистивний із сульфіду свинцю (PbS) і фоторезистивний із селеніду свинцю (PbSe) а також широкий спктр фотодіодів та фотодіодних матриць (лінійок). Недоліком таких детекторів можна вважати вплив на їх роботу температури, тому в більшості систем з їх використанням детектори термостабілізується.

Таким чином, доцільним є удосконалення БІЧ аналізаторних пристроїв із можливістю заміни джерела випромінювання та фотоприймача відповідно світло- і фотодоіодними компонентами, що мають високу інерційність і дозволяють реєструвати низькі рівні випромінювання.

4. Було проаналізовано заміну лампи розжарення, в типовій схемі аналізатору спектру, що вимірює спектр відбиття зерна пшениці, матрицею світлодіодів (Honeywall SEP8705-003) на базі побутової світлодіодної лампи Ecola GU10 4200K, та заміна штатного фотодетектору приладу, (фоторезистивний елемент із селеніду свинцю (PbSe)) монолітним фотодіодом P101 із вбудованим операційним підсилювачем фірми Texas Instruments. Таке рішення виключає більшість недоліків ламп розжарення у якості джерела випромінювання, та при правильному підборі світлодіодів по енергетичним характеристикам та лінійності спектральної кривої, дає змогу здешевити кінцевий зразок засобу реєстрації спектральної яскравості, потребує значно менших затрат електроенергії та має кращі характеристики тривалості роботи до настання деградації (а у випадку ламп розжарення – до деструкції).

5. Використання фотодіоду (у подальшому – лінійки фотодіодів) із вбудованим операційним підсилювачем, дозволяє уникнути необхідності використання фотодетекторів (на основі фоторезистивних елементів) із системою охолодження, а також реєструвати дуже малу інтенсивність випромінювання.

Таким чином, основним методом розрахунку коефіцієнта заломлення на даному етапі удосконалення вимірювального засобу є застосування аналогової електричної схеми включення випромінювача та фотодетектора з визначенням різницевих напруг на виході підсилювача фотодіоду.

Література

1. Берет И. Д. Применение метода инфракрасной спектроскопии для определения количества и качества клейковины в зерне пшеницы / И. Д. Берет, В. И. Киянов, А. А. Кремер, Л. Я. Найдис // Применение спектроскопии в ближней инфракрасной области для контроля качества продукции [4-й сборник научных трудов по ИКС] : тезисы докл. – М. : Интерагротех, 1989. – С. 322–327.

2. Вечкасов М. А. Приборы и методы в ближней инфракрасной области / М. А. Вечкасов, К. А. Кручинин – М. : Химия, 1977. – 280 с.

3. Горин В. М. Приборы для експресс-контроля и анализа показателей качества технологических процессов на перерабатывающих предприятиях / В. М. Горин, И. Г. Голубев. – М. : ФГПУ «Росинформагротех», 2001. – 104 с.

4. Кеслер Н. Методы инфракрасной спектроскопии в химическом анализе : учебн. [для студ. высш. учебн. зав.] / Н. Кеслер. – М. : Мир, 1984. – 287 с.

5. Крищенко В. П. Контроль качества зерна озимой пшеницы / В. П. Крищенко, Ю. Г. Сазонов, Л. А. Чуйкова // Химия в сельском хозяйстве. – 1987. – № 9. – С. 61–68.

6. Лузанов П.А. Исследование влияния конструктивных особенностей БИК-анализатора зерна на

точность измерений / П. А. Лузанов, К. А. Жаринов // Датчики и системы. – 2006. – № 8. – С. 49–52.

7. Лузанов П. А. Создание градуировочной модели, устойчивой к конструктивным изменениям инфракрасного анализатора / П. А. Лузанов, К. А. Жаринов // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16, № 4. – С. 80–84.

8. Норрис К. Х. Приборы для ближней инфракрасной спектроскопии / К. Х. Норрис // Применение спектроскопии в ближней инфракрасной области для контроля качества продукции [4-й сборник научных трудов по ИКС] : тезисы докл. – М. : Интерагротех, 1989. – С. 5–10.

9. Панкратов Г. Н. Определение состава ржано-пшеничных компонентов в муке с помощью ИК-спектроскопии / Г. Н. Панкратов, И. Д. Береш, В. П. Изосимов // Пищевая промышленность России на пороге XXI века : междунар. науч.-техн. конф. : тезисы докл. – М. : МГАПП, 1996. – С. 38–41.

10. Петрова Е. В. Определение состава ржано-пшеничной муки из зерносмесей методом инфракрасной спектроскопии / Е. В. Петрова, Г. Н. Панкратов // Индустрия продуктов здорового питания – третье тысячелетие (человек, наука, технология, экономика) : междунар. науч.-техн. конф. : тезисы докл. – М. : МГУПП, 1999. – Т. 24. – С. 13–16.

11. Хуршудян С.А. Аналитические приборы. Отечественная продукция / С. А. Хуршудян // Пищевая промышленность. – 2001. – Т. 8. – С. 46–47.

12. Хуршудян С.А. Применение оптических анализаторов в пищевой промышленности / С. А. Хуршудян // Пищевая промышленность. – 2000. – № 11. – С. 76–78.

13. Чулюков О. Г. Экспресс-контроль качества цельного зерна по спектрам пропускания в ближней инфракрасной области : дисс. … канд. техн. наук : 05.18. / Чулюков Олег Генадиевич. – М., 2007. – 168 с.

14. Cassells J.A., Reuss R., Osborne B.G. and Wesley I.J. Near infrared spectroscopic studies of changes in stored grain // J. Near Infrared Spectrosc. – 2007. – 15 (3). – P. 161–167.

15. Henry R.J. Calibration and use of a scanning near infrared reflectance spectrophotometer // International Symposium on NIRS. – Melbourne, Australia: Royal Australian Chemical Institute. – 1985. –12 (2). – P. 93–94.

References

1. Beret Y. D. Prymenenye metoda ynfrakrasnoi spektroskopyy dlia opredelenyia kolychestva y kachestva kleikovyny v zerne pshenytsy / Y. D. Beret, V. Y. Kyianov, A. A. Kremer, L. Ya. Naidys // Prymenenye spektroskopyy v blyzhnei ynfrakrasnoi oblasty dlia kontrolia kachestva produktsyy [4-y sbornyk nauchnykh trudov po YKS] : tezysy dokl. – M. : Ynterahrotekh, 1989. – S. 322–327.

2. Vechkasov M. A. Prybory y metody v blyzhnei ynfrakrasnoi oblasty / M. A. Vechkasov, K. A. Kruchynyn – M. : Khymyia, 1977. – 280 s.

3. Horyn V. M. Prybory dlia ekspress-kontrolia y analyza pokazatelei kachestva tekhpolohycheskykh protsessov na pererabatyvaiushchykh predpryiatyiakh / V. M. Horyn, Y. H. Holubev. – M. : FHPU «Rosynformahrotekh», 2001. – 104 s.

4. Kesler N. Metody ynfrakrasnoi spektroskopyy v khymycheskom analyze : uchebn. [dlia stud. vyssh. uchebn. zav.] / N. Kesler. – M. : Myr, 1984. – 287 s.

5. Kryshchenko V. P. Kontrol kachestva zerna ozymoi pshenytsy / V. P. Kryshchenko, Yu. H. Sazonov, L. A. Chuikova // Khymyia v selskom khoziaistve. – 1987. – # 9. – S. 61–68.

6. Luzanov P.A. Yssledovanye vlyianyia konstruktyvnykh osobennostei BYK-analyzatora zerna na tochnost yzmerenyi / P. A. Luzanov, K. A. Zharynov // Datchyky y systemy. – 2006. – # 8. – S. 49–52.

7. Luzanov P. A. Sozdanye hraduyrovochnoi modely, ustoichyvoi k konstruktyvnym yzmenenyiam ynfrakrasnoho analyzatora / P. A. Luzanov, K. A. Zharynov // Nauchnoe pryborostroenye. – 2006. – T. 16, # 4. – S. 80–84.

8. Norrys K. Kh. Prybory dlia blyzhnei ynfrakrasnoi spektroskopyy / K. Kh. Norrys // Prymenenye spektroskopyy v blyzhnei ynfrakrasnoi oblasty dlia kontrolia kachestva produktsyy [4-y sbornyk nauchnykh trudov po YKS] : tezysy dokl. – M. : Ynterahrotekh, 1989. – S. 5–10.

9. Pankratov H. N. Opredelenye sostava rzhano-pshenychnykh komponentov v muke s pomoshchiu YK-spektroskopyy / H. N. Pankratov, Y. D. Beresh, V. P. Yzosymov // Pyshchevaia promyshlennost Rossyy na porohe XXI veka : mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. : tezysy dokl. – M. : MHAPP, 1996. – S. 38–41.

10. Petrova E. V. Opredelenye sostava rzhano-pshenychnoi muky yz zernosmesei metodom ynfrakrasnoi spektroskopyy / E. V. Petrova, H. N. Pankratov // Yndustryia produktov zdorovoho pytanyia – trete tysiacheletye (chelovek, nauka, tekhnolohyia, ekonomyka) : mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. : tezysy dokl. – M. : MHUPP, 1999. – T. 24. – S. 13–16.

11. Khurshudian S.A. Analytycheskye prybory. Otechestvennaia produktsyia / S. A. Khurshudian // Pyshchevaia promyshlennost. – 2001. – T. 8. – S. 46–47.

12. Khurshudian S.A. Prymenenye optycheskykh analyzatorov v pyshchevoi promyshlennosty / S. A. Khurshudian // Pyshchevaia promyshlennost. – 2000. – # 11. – S. 76–78.

13. Chuliukov O. H. Ekspress-kontrol kachestva tselnoho zerna po spektram propuskanyia v blyzhnei ynfrakrasnoi oblasty : dyss. … kand. tekhn. nauk : 05.18. / Chuliukov Oleh Henadyevych. – M., 2007. – 168 s.

14. Cassells J.A., Reuss R., Osborne B.G. and Wesley I.J. Near infrared spectroscopic studies of changes in stored grain // J. Near Infrared Spectrosc. – 2007. – 15 (3). – P. 161–167.

15. Henry R.J. Calibration and use of a scanning near infrared reflectance spectrophotometer // International Symposium on NIRS. – Melbourne, Australia: Royal Australian Chemical Institute. – 1985. –12 (2). – P. 93–94.

Рецензія/Peer review : 10.06.2017 р. Надрукована/Printed :02.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Здоренко В.Г.

УДК 004.912

О.В. БАРМАК, О.В. МАЗУРЕЦЬ, А.В. ЖИВІЛІК
Хмельницький національний університет

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНОТУВАННЯ ТА РЕФЕРУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕКСТІВ

В статті було досліджено проблему семантичного аналізу текстів, зокрема автоматизованого згортання текстових документів. Визначено актуальність досліджень в напрямку автоматизованого анотування та реферування цифрових текстів. Запропоновано інформаційну технологію використання моделі Sub-Verb-Sub для формування анотацій та рефератів текстів. Інформаційна технологія автоматизованого анотування та реферування цифрових текстів призначена для знаходження ключових термінів у введеному тексті, створення на базі ключових термінів конструкції Sub-Verb-Sub у тексті, автоматизованого формування анотації та реферату тексту. Розглянуто тестовий програмний продукт, розроблений на засадах запропонованої інформаційної технології. Досліджено практичну ефективність розробленої інформаційної технології. Встановлено, що інформаційна технологія автоматизованого анотування та реферування може бути використана для ефективного автоматизованого реферування текстів.

Ключові слова: семантичний аналіз текстів, згортання текстів, дисперсійна оцінка, ключові терміни, анотація, реферат.

O.BARMAK, O.MAZURETS, A.ZHYVILIK
Khmelnytsky National University

INFORMATION TECHNOLOGY FOR AUTOMATIC CREATION OF ANNOTATIONS AND ABSTRACTS FROM DIGITAL TEXTS

The problem of semantic analysis of texts, in particular automation of compression of text documents, was researched in the article. The relevance of research in the direction of the automatic creation of annotations and abstracts from digital texts is determined. The information technology of using Sub-Verb-Sub model for creation of annotations and abstracts was suggested. Information technology for automatic creation of annotations and abstracts from digital texts is intended to find key terms in the text entered, to create of Sub-Verb-Sub constructs on the basis of key terms in the text, to create annotations and abstracts of the text atomically. The test program, which was developed based on suggested information technology, was estimated. The practical efficiency of the developed information technology was investigated. It has been established that information technology of automated annotation and abstract can be used for effective automated text referencing, but for

Keywords: semantic analysis of texts, curtailment of texts, dispersion evaluation, key terms, annotation, abstract.

Постановка проблеми в загальному вигляді

Використання комп'ютерів в людській діяльності, у тому числі і науковій, не тільки прискорює процеси створення та обробки документів, а й надзвичайно збільшує їх кількість і об'єм. Багато користувачів регулярно стикаються з необхідністю швидкого перегляду великого обсягу документів і вибору з них найбільш релевантних і дійсно потрібних документів. Виходом із ситуації є перегляд не всього документа, а його стислого опису – анотації або реферату [1]. Це зумовило необхідність проведення досліджень у вирішенні проблеми автоматичного реферування повнотекстових документів.

Одним із найважливіших напрямів у даних дослідженнях, є пошук шляхів і методів автоматичного стиснення (обсягового згортання) тексту. Під стисненням мається на увазі сукупність операцій аналітико-синтетичної переробки інформації, що переслідують мету створення вторинних документів чи вираження змісту вихідного тексту в більш економічній формі при максимальному збереженні його інформативності в похідному тексті. Реферування й анотування займають центральне місце у згортанні інформації, і всі проблеми, пов’язані з іншими різновидами згортання, так чи інакше відбиті в цих процесах.

При цьому, різниця між рефератом та анотацією полягає в наступному: реферат передає фактографічну інформацію і відповідає на питання, яку інформацію закладено в первинному документі; анотація ж являє собою стислу описову характеристику першоджерела і відповідає на запитання, про що говориться в первинному документі [2]. Крім того, в анотації основний зміст передається «своїми словами», які припускають високий ступінь абстрагування та узагальнення матеріалу. У рефераті ж використовуються ключові фрагменти, тобто формулюються узагальнення, запозичені з тексту оригіналу.

Реферування та анотування документів відносяться до числа основних видів інформаційної діяльності людини в ряду традиційних пошукових технологій [3]. Отриманий в результаті аналітичний огляд являє собою унікальний інформаційний продукт, здатний надати користувачеві повну і концентровану інформацію. Формування рефератів і анотацій вручну вимагає колосальних людських ресурсів, тому завдання створення ефективних методів автоматичного реферування та анотування набуває все більшої важливості.

Аналіз останніх досліджень

Автоматизоване вилучення знань з тексту є однією з основних задач штучного інтелекту і безпосередньо пов’язане з розумінням текстів на природній мові [4]. Задачу автоматизованої аналітичної обробки текстової інформації намагаються вирішити багато іноземних та вітчизняних вчених, серед яких можна виділити роботи В.І. Горькової, Є.А. Борохова, Х.П. Луна, В.Є. Берзона, І.П. Севбо, В.П. Леонова,

С.І. Гінді та інших.

Більшість існуючих програмних продуктів в розглядуваній області призначені переважно для статистичної обробки текстів. Наприклад, аналізатор від біржі контенту “Адвего” [6] вираховує кількість слів, кількість граматичних помилок і т.п. Сервіс також дозволяє побачити перелік ключових слів, які вираховуються за методом частотної оцінки (рис. 1). Текстовий аналізатор від компанії “Seozor” [7] допомагає визначити вагу слів в тексті (рис. 2) для с складання анкор-листа. За допомогою даного аналізатора тексту можна проаналізувати тексти ТОП-ової десятки сайтів, і визначити середню кількість входження до текстів ключових слів і символів. На основі частотного SEO аналізу тексту, сервіс самостійно визначає ключові слова в тексті і вагу кожного ключового слова.

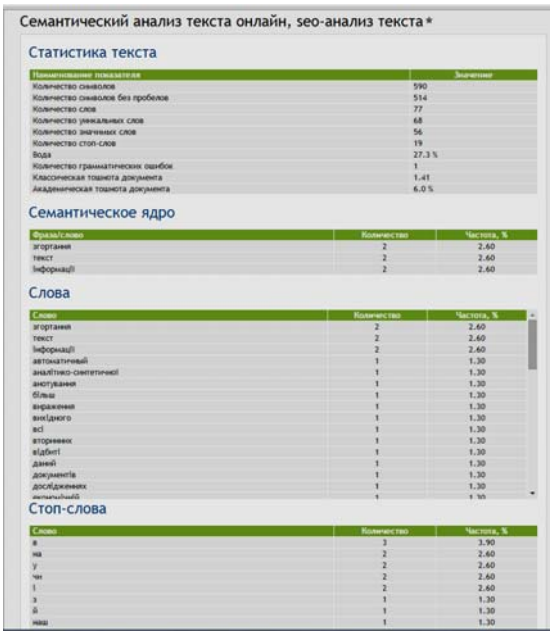


Рис. 1. Обробка тексту в системі “Адвего”

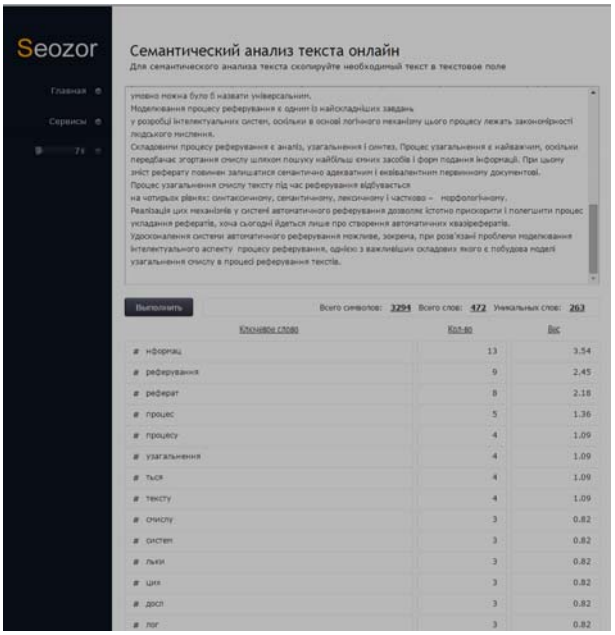


Рис. 2. Обробка тексту в системі “Seozor”

В Європі та США протягом останніх десятиліть проводяться активні теоретичні й практичні дослідження, спрямовані на пошуки ефективних методів автоматичного реферування. Незважаючи на початок активного вивчення альтернативних щодо екстрагування методів реферування, більшість алгоритмів сьогодні ґрунтується на екстрагуванні речень з оригінального тексту для побудови тексту реферату. Зараз активно проводяться машинні експерименти з оцінки існуючих систем автоматичного реферування, зі створення нових систем, що використовують Інтернет для одержання масивів оригінальних текстів і текстів рефератів для дослідження. В окрему проблему виділяються питання індикативного реферування і теоретичні питання ролі реферату в документальному пошуку.

Дослідження і розробки в галузі автоматичної обробки тексту (АОТ) в Європі і США привертають увагу найбільших приватних фірм і державних організацій найвищого рівня. Європейський Союз вже декілька років координує ряд програм у галузі автоматичної обробки тексту. Наприклад, Human Language Technology Sector of the Information Society Technologies (IST) Programme [8]. Основні розробки присвячено автоматизації процесу синтаксичного аналізу для різних систем АОІ, в тому числі й АР.

На відміну від лексико-граматичного аналізу тексту, синтаксичний аналіз – галузь прикладної лінгвістики, що перебуває в стані розвитку. Мета синтаксичного аналізу – автоматична побудова функціонального дерева фрази, тобто пошук взаємозалежності між різнорівневими елементами речення.

Так, синтаксичний аналізатор Ergo Linguistic Technologies Parser [9], розроблений Дереком Бікертоном і Філіпом Браліком з Університету Гонолулу, використовує широковідому схему аналізу і має наочне вираження. ERGO орієнтує свій парсер на використання інтерфейсів у вигляді питань і відповідей. ERGO поки що є єдиною компанією, яка має парсер, здатний визначати тип запитання (питання до підмета, суб’єкта, прямого або непрямого додатка чи обставини) і «миттєво» конструювати відповідь.

Один із найбільш вдалих синтаксичних аналізаторів Functional Dependency Grammar [10] створений дослідниками з Гельсінського університету, котрі пізніше заснували дві фірми: Lingsoft і Conexor. Рання версія під назвою ENGCG (English Constraint Grammar) була використана для анотації найбільшого у світі корпусу – Bank of English, що належить видавництву Collins/Harper Publishers. Особливістю даного синтаксичного аналізатора є те, що у випадках, коли неможливо зняти багатозначність, синтаксичний аналізатор або видає декілька варіантів аналізу, або не добудовує дерево для даної частини фрагменту.

Один із найбільш оригінальних підходів до синтаксичного аналізу тексту – Link Parser – розроблено в Carnegie-Melon University. Цей синтаксичний аналізатор – єдиний, чиї початкові коди були опубліковані он-лайн [11]. Тоді як більшість систем синтаксичного аналізу використовують структури рівня іменних і дієслівних груп у побудові дерева фрази, Link Grammar, яка покладена в основу Link Parser, використовує

інформацію про типи зв'язків, які кожне слово може мати зі словами, що знаходяться праворуч або ліворуч, а також декілька загальних граматичних правил.

На ринку існує зовсім невелика кількість традиційних програм реферування, тобто таких, які виділяють найбільш вагомі фрагменти з тексту, використовуючи статистичні алгоритми або слова-підказки. Inxight Summarizer – одна з найбільш відомих комерційно поширюваних систем реферування. Inxight Summarizer був створений у Дослідницькому центрі Ксерокса в Пасло Альто [12].

Серед комерційних систем також можна відзначити Prosum [13] – систему реферування, розроблену British Telecommunications Laboratories у межах експериментальної комерційної онлайн-платформи TranSend, що являє собою cgi-скрипт, вбудований до веб-сторінки.

Оскільки інтерес до традиційних систем автоматичного реферування неухильно знижується, багато компаній пропонують інші підходи. Одним із нетрадиційних рішень є використання іменних груп, виділених за допомогою часткових синтаксичних аналізаторів. Алгоритми такого типу використовуються в програмному продукті Extractor, що створений в Інституті інформаційних технологій Національної дослідницької ради Канади. Він являє собою модуль, що виділяє з наданого йому на вхід тексту найбільш інформативні іменні групи. За замовчанням кількість таких груп – сім, незалежно від довжини тексту. Extractor використовується в програмних продуктах фірм ThinkTank Technologies і Tetranet, а також у пошуковій системі Журналу досліджень в галузі штучного інтелекту.

Система автоматичного реферування, інтегрована в текстовий редактор Microsoft Word, працює на основі методу екстрагування. Ця система далека від досконалості, однак виробляє більш-менш вдалі квазіреферати.

Отже, останнім часом над завданнями синтаксичного аналізу речення та розробки методів автоматичного згортання текстів працює багато дослідницьких груп, і на даний момент цей напрям залишається актуальним. Якщо семантичний вміст тексту може бути переданий множиною ключових термінів [14], то для побудови реферату та анотації необхідне зв'язування термінів в рамках закладеної у текст семантичної моделі, що може бути здійснено, зокрема, шляхом використання відомої моделі «суб'єкт-об'єкт-дія» (СОД, англ.: Sub-Verb-Sub) [15].

Постановка задачі

Метою даної роботи є розробка інформаційної технології використання моделі «Sub-Verb-Sub» для формування згорнутих зразків текстових документів.

Викладення основних матеріалів дослідження

Вирішення задачі автоматизованого формування згорнутих зразків текстових документів з використанням моделі СОД складається з ряду етапів перетворення інформації. Вхідними даними є цифровий текст або його визначена частина; вихідними даними є текст анотації чи реферату, релевантний вхідному тексту.

На рисунку 3 надано функціональну діаграму (за стандартом IDEF0 [16]), яка ілюструє послідовність дій при формуванні згорнутих зразків текстових документів шляхом використання моделі Sub-Verb-Sub.

Рис. 3. Діаграма етапів у формуванні згорнутих зразків текстових документів

Кожному етапу з наведених відповідає ряд послідовностей перетворення даних, які загалом формують інформаційну технологію використання моделі Sub-Verb-Sub для формування згорнутих зразків текстових документів, наведену на рисунку 4.

Попередня технічна обробка тексту (Блок 1) полягає в обробці розділових знаків й усуненні неоднозначного іменування термінів. Неоднозначне іменування термінів 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), для використання в рамках окремого матеріалу обирається лише один варіант, оскільки як для машинної, так і для антропосемантичної ідентифікації термінів бажаною (а в науковій літературі – обов'язковою) є символьна уніфікація ідентифікатора. Навіть у випадку введення нового скорочення, в цій же позиції у тексті присутня також і повна назва. Отже, усунення неоднозначної іменованості термінів переслідує мету уникнути випадків, коли при автоматичному аналізі контенту навчальних матеріалів одне поняття буде розглядатись як кілька окремих термінів.

При обробці розділових знаків проводиться їх видалення й стандартизація. Власне розділові знаки видаляються, а якщо вони є частиною слів – уніфікуються. Цей етап є суто технічним і покликаний зменшити кількість «сміття» у контенті, яке заважає автоматизованому аналізу.

Формування множини термінів (Блок 2) проводиться за кілька етапів. Спершу виконується пошук важливих слів з використанням методу дисперсійного оцінювання, який показав свою достатню ефективність у рамках попередніх досліджень [17].

Рис. 4. Схема інформаційної технології автоматизованого формування згорнутих зразків текстових документів

Дисперсійна оцінка є оцінкою дискримінантної сили слів й дозволяє відкинути із загальної множини широковживаних у тексті слів слова, що розташовані рівномірно, із достатньою ефективністю [18]. Для формування вихідної множини слів слова у множині, сформованої у результаті дисперсійного

оцінювання, сортуються за зменшенням значення дисперсійної оцінки. Для якісного пошуку ключових слів використовується не вся множина, а визначена частина її елементів із дисперсійною оцінкою вище порогової величини.

Словосполучення ж є стійкими сукупностями важливих слів, що згруповані у визначеній послідовності та у такій комбінації неодноразово присутні в розглядуваному контенті. Для формування множини словосполучень проводиться пошук неперервних скупчень ключових слів протягом тексту й знайдені зразки додаються у масив словосполучень. Отриманий масив словосполучень сортується за частотою вживання, після чого з нього видаляються неключові словосполучення – такі, що зустрічаються в тексті один раз, або не містять двох і більше іменників чи прикметників.

На основі отриманих даних проводиться формування вихідної множини термінів [19]. Інтеграція множини ключових слів та множини ключових словосполучень відбувається шляхом заміщення словосполученнями слів, які є переважно елементами відповідних словосполучень. Результатом етапу є об’єднана вихідна множина термінів. Об’єднана множина термінів компактифікується шляхом видалення повторів серед її елементів і сортується за значеннями їх дисперсійної оцінки.

Пошук речень з термінами у моделі Sub-Verb-Sub (Блок 3) ставить за мету знайти важливі речення в тексті й визначити їх семантичний вміст шляхом їх співставлення з множиною термінів через ідентифікацію моделей Sub-Verb-Sub. Конструкція моделі Sub-Verb-Sub (рис. 5) включає складові:

- іменник, що виступає суб’єктом – підметом зі значенням виробника дії або носія стану;
- дієслово, що виражає дію – діяльнісне співвідношення між суб’єктом і об’єктом;
- іменник, що виступає об’єктом – додатком, на який спрямовано практичну або пізнавальну діяльність суб'єкта.

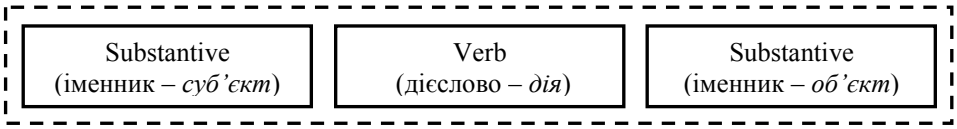


Рис. 5. Схема конструкції моделі Sub-Verb-Sub

Модель Sub-Verb-Sub дозволяє фіксувати природні елементи формування зв’язних текстів, коли введення чи переміщення фокусу до нових термінів передбачає наступне їх використання в подальших семантичних побудовах. При цьому в межах речення відбувається семантичне об'єднання суб'єкта, про який що-небудь стверджується чи заперечується, та об'єкта, на який спрямовано практичну або пізнавальну діяльність суб'єкта в рамках єдиної семантичної моделі. При цьому об'єктом може бути і власне суб'єкт. Ці одиниці утворюють основу семантичної структури речення. Центральними категоріями семантичної структури речення є:

1) суб'єкт – виробник дії або носій стану;

2) дія – предикативна ознака, що виявляється в об'єктивно-модальному плані: у часі й у певному відношенні до дійсності, й ця категорія в подальшому реалізується як дія;

3) об'єкт – те, на що спрямована дія або до якого звернений стан.

Категорія предикативної ознаки (дії або стану), тобто ознаки, віднесеної в певний часовий план, завжди присутня в компоненті структурної схеми речення: в одному з головних членів двукомпонентного речення або в головному члені однокомпонентного речення. Всередині предикативної ознаки основне протиставлення здійснюється на підставі його віднесеності або невіднесеності до суб’єкта. Категорія суб’єкта є категорією носія предикативної ознаки: виробника дії або носія стану. Категорія об’єкта присутня у тих реченнях, в яких ознака з’являється як конкретна дія, діяльність, розумова, емоційна або вольова активність чи як чиєсь відношення до чогось. А об’єкт – це те, на що безпосередньо спрямовано дію, діяльність, до чого безпосередньо звернене чиєсь відношення.

Початковим етапом пошуку речень з термінами у моделі Sub-Verb-Sub є формування множини речень з дієслівним роздільником. У отриманій множині вилучаються речення, в яких відсутні дві ключові іменникові групи – суб’єкта та об’єкта. Співставлення речень з результуючої множини множині термінів дозволяє визначити оцінку речень на ступінь відповідності моделі Sub-Verb-Sub шляхом врахування значень дисперсійної оцінки використаних у реченнях термінів.

Формування реферату (Блок 4) є процесом екстрагування з тексту послідовно семантично пов’язаних речень. В рамках розглядуваної моделі цей процес передбачає визначення вузлових елементів онтології та його обсягове згортання (рис. 6). Вузлові елементи онтології представлені множиною ключових термінів, множина конструкцій Sub-Verb-Sub виражає семантичний базис тексту, а множина актуальних речень з термінами у моделі Sub-Verb-Sub передає семантичний вміст тексту.

Шляхом запропонованого екстрагування з тексту послідовно семантично повязаних речень проводиться побудова всіх можливих варіантів семантичних ланцюгів. Етап оцінки варіантів семантичних ланцюгів враховує: сумарну оцінку речень на ступінь відповідності моделі Sub-Verb-Sub; довжину семантичного ланцюга; ступінь охоплення онтології – що ставить за мету зменшити імовірність включення до результуючого семантичного ланцюга менш важливих термінів при відсутності в ньому більш важливих термінів. У результаті порівняння оцінок варіантів семантичних ланцюгів забезпечується вибір

результуючого набору речень, що буде екстрагований з вхідного тексту в якості реферату.

Формування анотації (Блок 5) відбувається шляхом побудови послідовності семантичних конструкцій через відтворення їх сенсу на основі моделі Sub-Verb-Sub. При цьому в якості каркасу використовується один з семантичних ланцюгів пов'язаних речень, які сформовані на попередньому етапі.

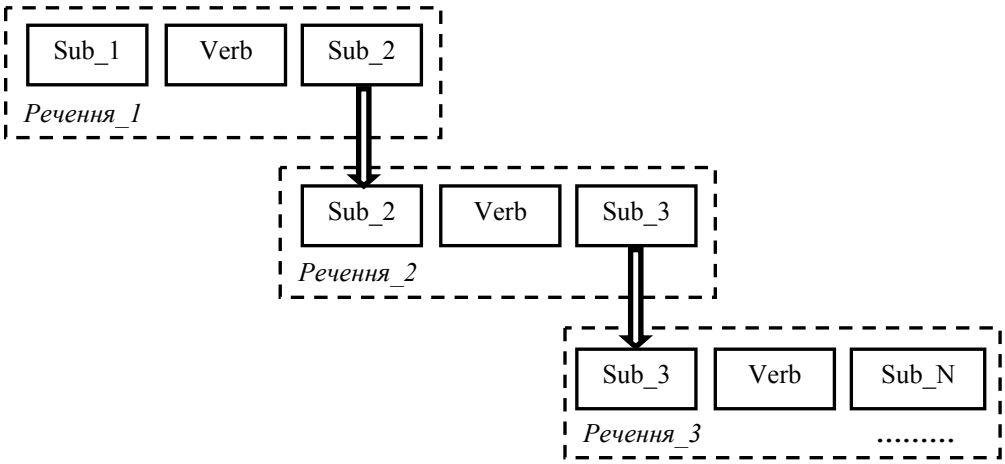


Рис. 6. Схема методу послідовного зв'язування речень за моделлю Sub-Verb-Sub

З точки зору цифрового вмісту, поверхнева структура речення ототожнюється з його формальною синтаксичною організацією, а глибинна структура – із семантичною. При цьому синтаксична структура є формальним виразником семантичної структури, що відбиває ідентичні або тотожні ситуації, які розглядаються в реченні. Тому поверхнева структура речення є основою для аналізу структури речення, адже саме вона доступна для цифрової обробки.

Типології речень з розширеними структурними схемами наразі практично не розроблено. Втім основою для розширеної структури слугує мінімальна структурна схема, що залежно від її граматичного оформлення, лексичного наповнення й ступеня адекватності описуваної ситуації визначає лексичні й граматичні параметри розширеної моделі речення, що є похідною від простої моделі. Тому можна припустити, що шляхом використання простої моделі речень також можливо достатньо повно виразити певний зміст поза контекстом.

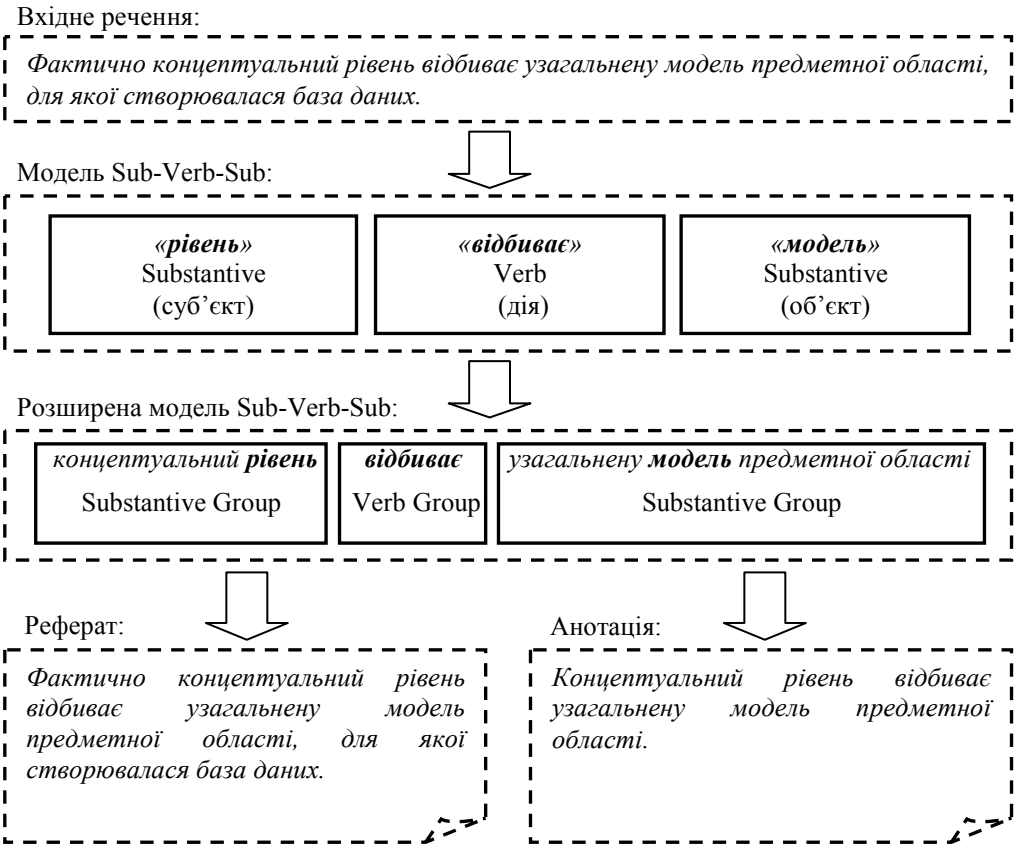


Рис. 7. Еволюція конструкції речення за моделлю Sub-Verb-Sub

Використовуючи множину ключових слів як перелік прототипів Sub, беруться до уваги речення, що містять конструкції Sub-Verb-Sub, причому в рамках речень обов'язкова наявність двох елементів з множини Sub, розділених дієсловом з множини Verb. При цьому наявність всередині фрагменту речення, що охоплюється конструкцією Sub-Verb-Sub, інших слів, які не входять до зазначених множин, ігнорується як другорядна інформація. При цьому для семантичної характеристики речення актуальним є поняття позиції. Під позицією розуміється та ланка в структурі речення, яку займає певний термін з множини Sub. Таким чином, для повноти передавання сенсу необхідне використання не тільки власне конструкції Sub-Verb-Sub, що складається з різних словесних форм, а й її розширеної версії, у якій кожен з елементів являє собою структуру, до якої входять терміни із зазначених переліків в поєднанні з уточнюючими додатковими членами речення (рис. 7). Зокрема, до іменникової групи можуть входити інші іменники (не в називному відмінку) та прикметники (без врахування малих частин речення на кшталт сполучників), а дієслівна група може включати декілька дієслів.

Таким чином, шляхом прив'язки до кожного з елементів моделі множини доповнюючих другорядних слів відбувається ідентифікація іменникових і дієслівних груп, й для формування анотації проводиться генерація речень шляхом відтворення семантичного вмісту речень наборами іменникових і дієслівних груп. У якості текстового каркасу використовується один з семантичних ланцюгів пов'язаних речень, які сформовані на етапі формування й оцінки варіантів семантичних ланцюгів.

Програмна реалізація

З метою перевірки ефективності запропонованої інформаційної технології, на її засадах було створено тестовий програмний продукт, який дозволяє за введеним текстом виконати наступні функції:

- попередня обробка введеного тексту
- автоматизоване визначення ключових термінів у введеному тексті;
- формування на базі ключових термінів конструкцій Sub-Verb-Sub;
- витяг статистичних відомостей по простих семантичних конструкціях Sub-Verb-Sub у тексті;
- автоматизоване формування анотації тексту;
- автоматизоване формування реферату тексту.

Автоматизована система формування згорнутих зразків текстових документів за моделлю Sub-Verb-Sub реалізована з використанням мови програмування C# на платформі .NET Framework. Система використовує базу даних (рис. 8) на СКБД Microsoft SQL Server, призначену для зберігання даних про слова української мови, їх леми та назви словоформ.

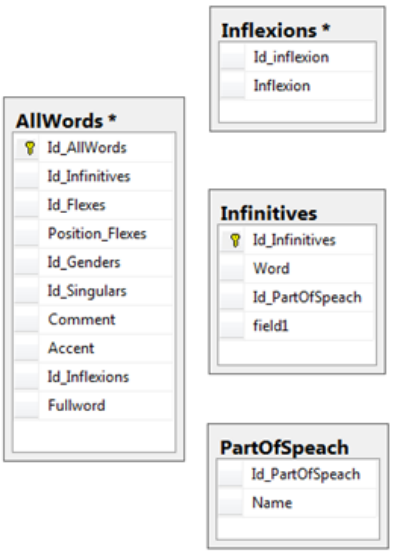


Рис. 8. Схема БД системи

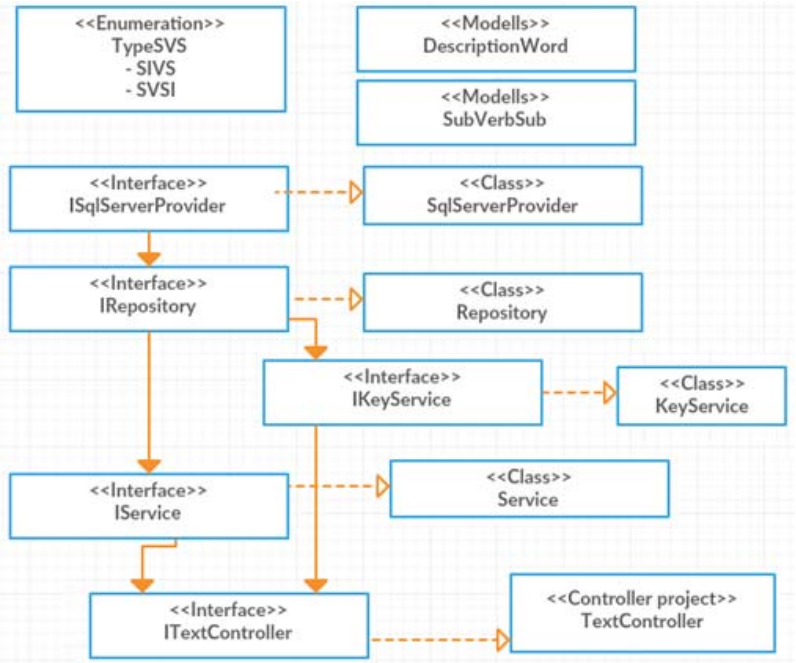


Рис. 9. Діаграма класів системи

Таблиця «AllWords» містить в собі перелік слів української мови в різних словоформах, використовується для визначення правильності написання слова і для подальшого визначення його властивостей. Таблиця «Infinitives» зберігає леми – інфінітивні слова до тих, які зберігаються в таблиці «AllWords». Таблиця «PartOfSpeach» зберігає в собі назви частин мови і використовується, зокрема, для подальшого формування іменникових та дієслівних груп слів. Таблиця «Inflexion» містить в собі дані про відмінок слова чи інший параметр його модифікації.

Діаграму класів автоматизованої системи формування згорнутих зразків текстових документів подано на рисунку 9. Система побудована на основі 4 проектів і одного проекту для юзер-інтерфейсу (UI).

Так, проект “Models” описує моделі даних. Проект “Repository” працює з базою даних і займається вибіркою даних з БД, також вибірка даних відбувається в асинхронному режимі. Проект “Service” займається бізнес-логікою системи, використовує “Repository” для вибірки даних; на основі цих даних сервіс займається формуванням семантичних конструкцій, ключових слів, лематизацією, нормалізацією. Проект “Controller” виступає обгорткою і попереднім шаром перед UI, а також зберігає проміжні дані для роботи з сервісом; він працює із сервісом і не має доступу до репозитарію. Така архітектура дозволяє системі працювати максимально незалежно.

Клас “TextHelper” виконує нормалізацію тексту, а також методом дисперсійної оцінки формує множину ключових слів з їхніми вагами, які в подальшому використовуються в системі. Клас “Repository” відповідає за роботу з базою даних і дає запит до БД, яка в свою чергу повертає дані в програму, й використовуючи ключові терміни, сформовані класом “KeyService”, цей клас обробляє їх. Клас “Repository” також використовується для обробки вхідного тексту і формування семантичних конструкцій.

В рамках дослідження ефективності запропонованої інформаційної технології, у відповідний елемент тестового програмного продукту вводився текст (рис. 10), який після приведення до стилістичної та термінологічної однорідності, видалення й стандартизації розділових знаків зчитувався й оброблявся системою. В результаті в UI автоматично формуються дві таблиці: перша містить в собі ключові терміни, а друга – їх відповідні лематизовані аналоги (рис. 11).

На наступному етапі проводиться аналіз тексту з метою сформувати множину наявних елементів моделі Sub-Verb-Sub. Шляхом співставлення наявних елементів моделі Sub-Verb-Sub з термінами у моделі Sub-Verb-Sub формується множина речень з дієслівним розділником. Для дослідницьких цілей система дозволяє проводити аналіз як речень на предмет наявності в них елементів моделі Sub-Verb-Sub (рис. 12), так і елементів моделі Sub-Verb-Sub на предмет пошуку пов’язаних з ними речень тексту й формування статистики (рис. 13).

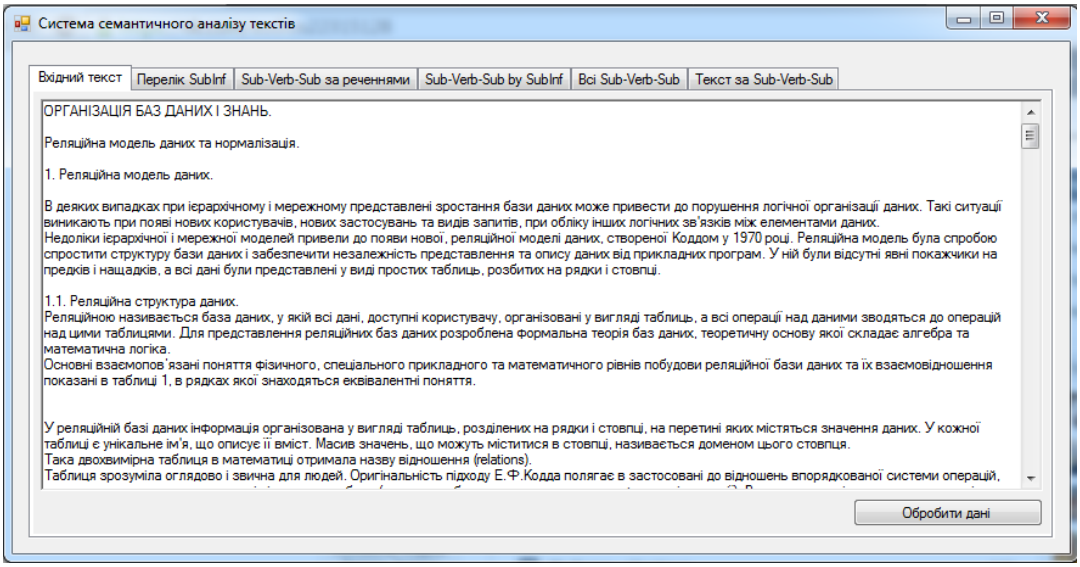


Рис. 10. Введення тестового тексту в систему

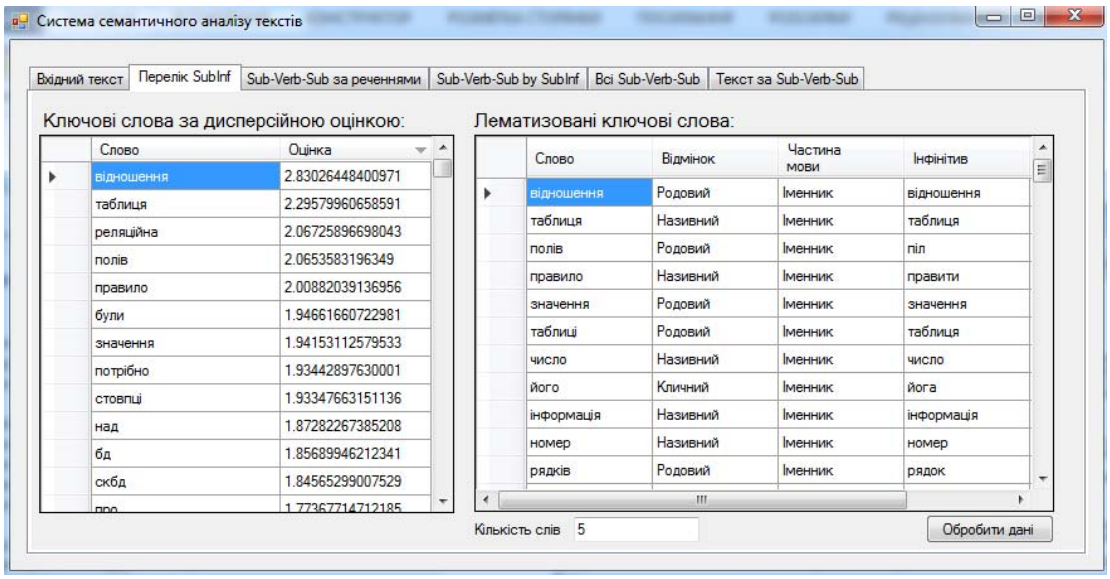


Рис. 11. Формування системою множини ключових термінів та їх аналіз

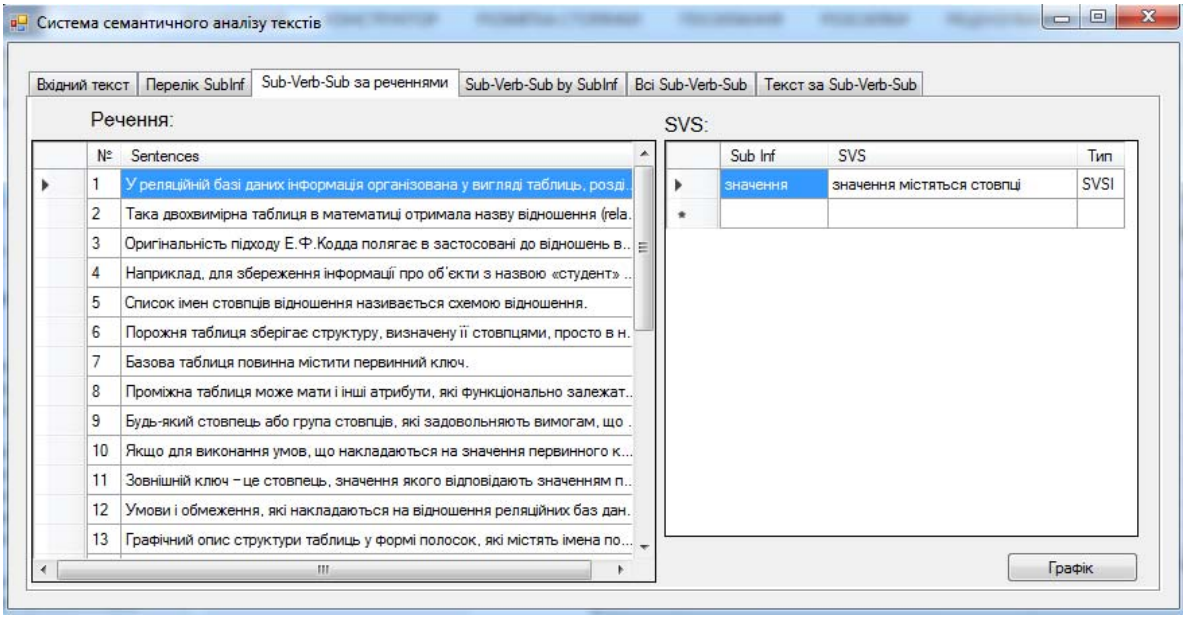


Рис. 12. Аналіз тексту на відповідність елементів моделі Sub-Verb-Sub реченням

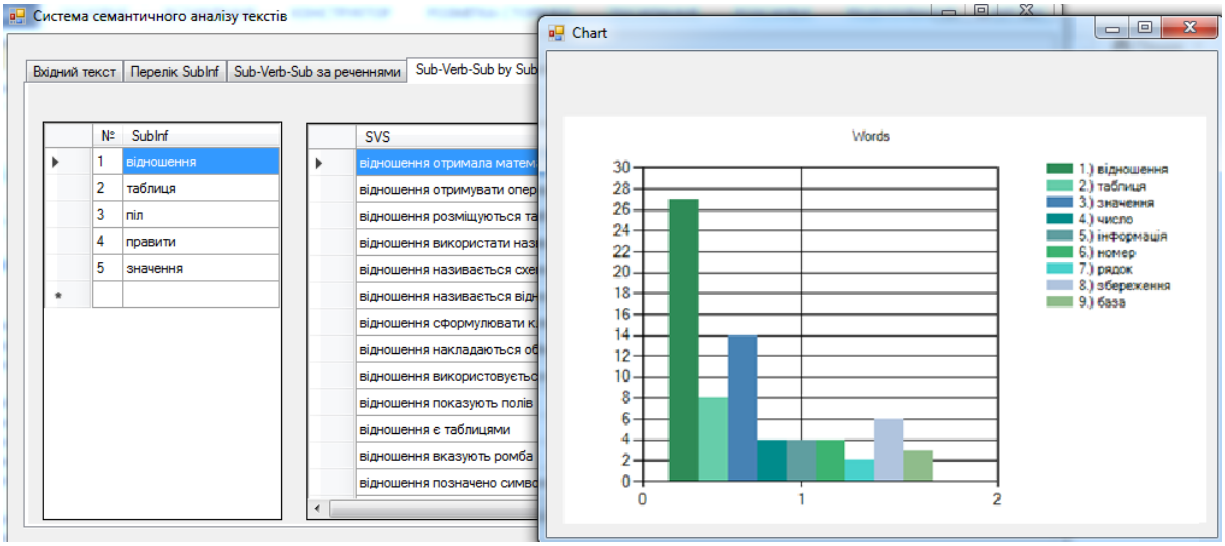


Рис. 13. Аналіз тексту на відповідність речень елементам моделі Sub-Verb-Sub

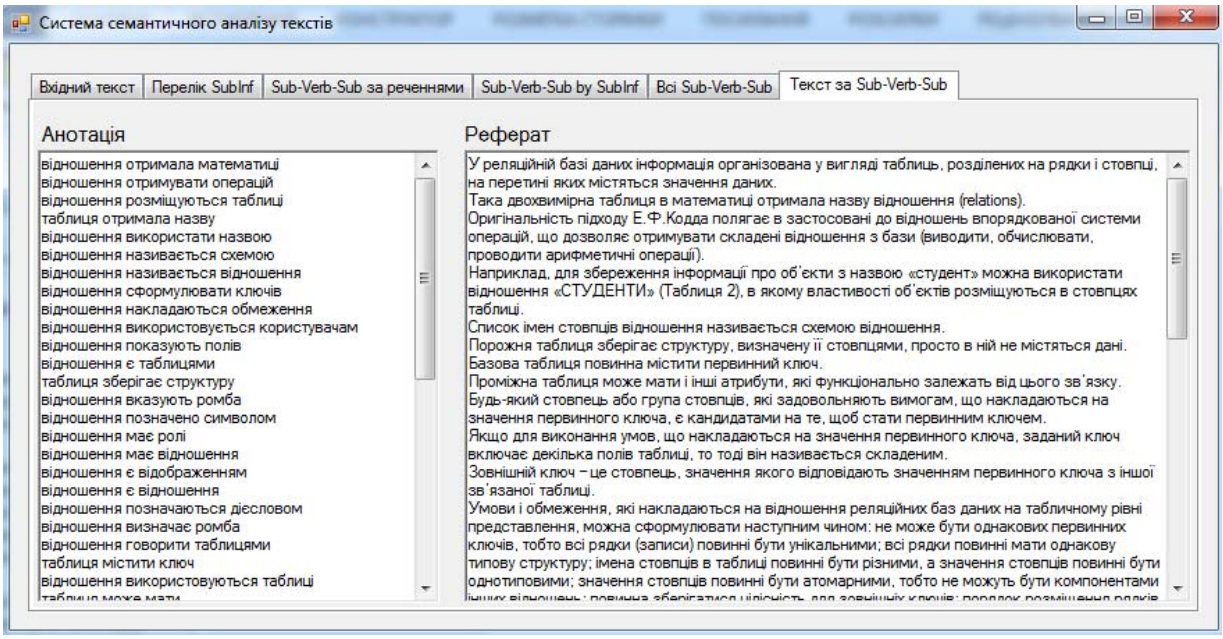


Рис. 14. Формування згорнутих текстів шляхом послідовного зв'язування речень моделі Sub-Verb-Sub

В результаті будуються всі можливі варіанти семантичних ланцюгів з моделями Sub-Verb-Sub, оцінюються, й вибирається найбільш прийнятний варіант. Саме на його основі шляхом екстрагування з тексту послідовно семантично пов'язаних речень проводиться побудова реферату. На основі цього ж семантичного ланцюгу формується анотація. Побудова анотації відбувається шляхом побудови послідовності семантичних конструкцій шляхом відтворення їх сенсу на основі моделі Sub-Verb-Sub (рис. 14).

Розглянутим чином, на основі введеного у систему тексту відбувається формування відповідних реферату та анотації як зразків згорнутого тексту.

Результати дослідження

Дослідження практичної ефективності розробленої інформаційної технології використання моделі Sub-Verb-Sub для формування згорнутих зразків текстових документів переслідує перевірку ефективності формування анотацій та рефератів як кінцевої мети створення інформаційної технології. Для перевірки якості формування анотацій було досліджено ефект від використання розробленої системи за критерієм оцінки за введеним текстом (37 речень) анотацій, сформованих за опціями: 3 речення, 5 речень, 10 речень. Кожне речення анотацій містить одну конструкцію моделі Sub-Verb-Sub. Оцінка проводилась дванадцятьма піддослідними, що оцінювали якість анотації по десятибальній шкалі. В результаті було отримано статистичні дані, середні значення яких показано на рисунку 15.

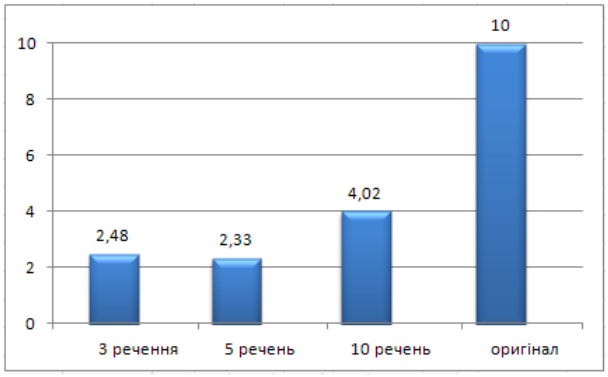


Рис. 15. Середня оцінка якості автоматично сформованої анотації (шкала – 10 балів)

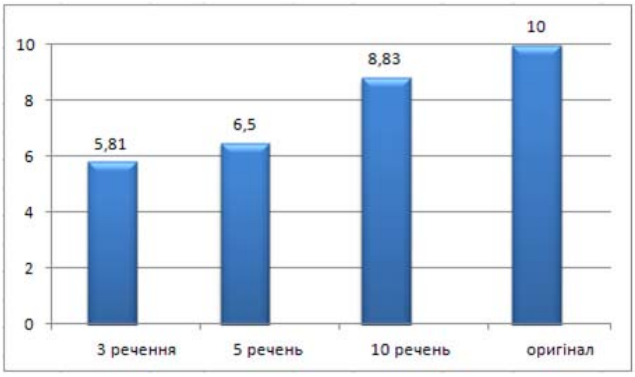


Рис. 16. Середня оцінка якості автоматично сформованого реферату (шкала – 10 балів)

Для перевірки якості формування реферату було досліджено ефект від використання розробленої системи за критерієм оцінки за введеним текстом (37 речень, текст той самий) рефератів, сформованих за аналогічними опціями: 3 речення, 5 речень, 10 речень. Кожне речення реферату може містити кілька конструкцій моделі Sub-Verb-Sub, хоча використовується внаслідок наявності лише однієї з них. Оцінка проводилась також дванадцятьма тими ж піддослідними, що оцінювали якість реферату по десятибальній шкалі. На рисунку 16 відображено середні значення отриманих статистичних даних.

Дискусія

Дослідження практичної ефективності розробленої інформаційної технології використання моделі Sub-Verb-Sub для формування згорнутих зразків текстових документів показало низьку ефективність застосування моделі Sub-Verb-Sub для автоматизованого анотування текстів. При цьому, дослідження показало достатньо високу ефективність застосування моделі Sub-Verb-Sub для автоматизованого реферування текстів. У зв'язку з чим розроблена інформаційна технологія може бути використана для автоматизованого реферування текстів, хоча й існують перспективи її подальшого удосконалення. Однак розроблена інформаційна технологія без додаткових елементів удосконалення не може бути використана для якісного автоматизованого анотування текстів внаслідок виявленої низької фактичної ефективності.

Висновки

В статті було досліджено проблему семантичного аналізу текстів, а саме автоматизованого згортання текстових документів шляхом автоматизації формування анотацій та рефератів. Зокрема, було проведено аналіз ефективності застосування моделі Sub-Verb-Sub для автоматизованого реферування та анотування текстів.

Запропоновано інформаційну технологію використання моделі Sub-Verb-Sub для формування згорнутих зразків текстових документів, яка дозволяє за введеним текстом автоматизовано визначати ключові терміни у введеному тексті, формувати на базі ключових термінів конструкції Sub-Verb-Sub у тексті, автоматизовано формувати анотації та реферати тексту.

Розглянуто тестовий програмний продукт, розроблений на засадах запропонованої інформаційної технології й призначений для дослідження ефективності розробленої інформаційної технології. Дослідження практичної ефективності розробленої інформаційної технології визначення семантичного вмісту тексту показало низьку ефективність застосування моделі Sub-Verb-Sub для автоматизованого анотування текстів, проте достатньо високу ефективність застосування моделі Sub-Verb-Sub для автоматизованого реферування

текстів. У зв'язку з чим розроблена інформаційна технологія може бути використана для автоматизованого реферування текстів.

Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення методів та алгоритмів, що забезпечують коректне автоматизоване визначення й локалізацію іменникових груп у реченнях, а також на поширення можливостей технології на ефективну роботу із складними реченнями та семантичними конструкціями. В результаті планується досягти суттєвого підвищення якості автоматизованого анотування текстів з використанням розробленої інформаційної технології використання моделі Sub-Verb-Sub для формування згорнутих зразків текстових документів.

Література

1. Кліменко В.І. Аналіз сучасних методів автоматизації анотування та реферування текстів / В. І. Кліменко, А. В. Живілік, О. В. Мазурець // Збірник наукових праць за матеріалами дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2015». – Хмельницький, 2015. – С. 116–123.
2. Коханова І. О. Проблеми та похибки методів автоматизованого реферування документів / І. О. Коханова // Вісник Книжкової палати. – 2014. – № 9. – С. 31–32.
3. Снитюк В. Е. Интеллектуальное управление оцениванием знаний / В. Е. Снитюк, К. Н. Юрченко. − Черкассы, 2013. − 262 с.
4. Даревич Р. Р. Підвищення ефективності інтелектуального аналізу тесту шляхом зважування понять моделі онтології / Р. Р. Даревич // Штучний інтелект. – 2005. – № 3. – С. 571–577.
5. Автоматизоване реферування – Вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://uk.wikipedia.org/wiki/Автоматизоване реферування.
6. Семантичний аналіз тексту – seo-аналізатор «Адвего» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://advego.ru/text/seo/.
7. Семантичний онлайн аналізатор тексту «Seozor» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://seozor.ru/tools/analyzer.php.
8. Human Language Technology Sector of the Information Society Technologies (IST) Programme [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.linglink.lu.
9. ERGO Linguistic Tecnologies [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ergo-ling.com.
10. Functional Dependency Grammar [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.conexor.fi.
11. Link Grammar Homepage [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://bobo.link.cs.cmu.edu/link.
12. Inxight Summarizer [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.inxight.com.
13. Prosum Summarizer [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://transend.labs.bt.com/cgi-bin/prosum/prosum.
14. 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.
15. Про поняття моделі простого речення [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.jstor.org/stable/43659932.
16. IDEF5 – Ontology Description Capture Method [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу : http://www.idef.com/IDEF5.htm.
17. Бармак О. В. Методи автоматизації визначення семантичних термінів у навчальних матеріалах / О. В. Бармак, О. В. Мазурець // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – Хмельницький, 2015. – № 2(223). – С. 209–213.
18. Ландэ Д. В. Компактифицированный горизонтальный граф видимости для сети слов / Д. В. Ландэ, А. А. Снарский // Труды Международной научной конференции «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2013. Знания и рассуждения». – Киев : КПИ,2013. – С. 158–164.
19. 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. Klimenko V.I. Analiz suchasnykh metodiv avtomatyzatsii anotuvannia ta referuvannia tekstiv / V. I. Klimenko, A. V. Zhyvilik, O. V. Mazurets // Zbirnyk naukovykh prats za materialamy deviatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Aktualni problemy kompiuternykh tekhnolohii 2015». – Khmelnytskyi, 2015. – S. 116–123.
2. Kokhanova I. O. Problemy ta pokhybky metodiv avtomatyzovanoho referuvannia dokumentiv / I. O. Kokhanova // Visnyk Knyzhkovoi palaty. – 2014. – # 9. – S. 31–32.
3. Snytiuk V. E. Yntellektualnoe upravlenye otsenyvanyem znanyi / V. E. Snytiuk, K. N. Yurchenko. − Cherkassы, 2013. − 262 s.
4. Darevych R. R. Pidvyshchennia efektyvnosti intelektualnoho analizu testu shliakhom zvazhuvannia poniat modeli ontolohii / R. R. Darevych // Shtuchnyi intelekt. – 2005. – # 3. – S. 571–577.

5. Avtomatyzovane referuvannia – Vilna entsyklopediia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://uk.wikipedia.org/wiki/Avtomatyzovane_referuvannia.

6. Semantychnyi analiz tekstu – seo-analizator «Adveho» [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://advego.ru/text/seo/.

7. Semantychnyi onlain analizator tekstu «Seozor» [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://seozor.ru/tools/analyzer.php.

8. Human Language Technology Sector of the Information Society Technologies (IST) Programme [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.linglink.lu.

9. ERGO Linguistic Tecnologies [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.ergo-ling.com.

10. Functional Dependency Grammar [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.conexor.fi.

11. Link Grammar Homepage [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://bobo.link.cs.cmu.edu/link.

12. Inxight Summarizer [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.inxight.com.

13. Prosum Summarizer [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://transend.labs.bt.com/cgi-bin/prosum/prosum.

14. Barmak O. V. Informatsiina tekhnolohiia avtomatyzovanoho vyznachennia terminiv u navchalnykh materialakh / O. V. Barmak, O. V. Mazurets // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh» – Khmelnytskyi, 2015. – # 2. – C. 94–102.

15. Pro poniattia modeli prostoho rechennia [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : https://www.jstor.org/stable/43659932.

16. IDEF5 – Ontology Description Capture Method [Elektronnyi resurs]. – 2015. – Rezhym dostupu : http://www.idef.com/IDEF5.htm.

17. Barmak O. V. Metody avtomatyzatsii vyznachennia semantychnykh terminiv u navchalnykh materialakh / O. V. Barmak, O. V. Mazurets // Herald of Khmelnytsky National University. Seriia: Tekhnichni nauky. – Khmelnytskyi, 2015. – # 2(223). – S. 209–213.

18. Lande D. V. Kompaktyfytsyrovannyi horyzontalnyi hraf vydymosty dlia sety slov / D. V. Lande, A. A. Snarskyi // Trudy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsyy «Yntellektualnyi analyz ynformatsyy YAY-2013. Znanyia y rassuzhdenyia». – Kyev : KPY,2013. – S. 158–164.

19. Krak Yu. V. Praktychne doslidzhennia efektyvnosti informatsiinoi tekhnolohii avtomatyzovanoho vyznachennia semantychnykh terminiv v kontenti navchalnykh materialiv / Yu. V. Krak, O. V. Barmak, O. V. Mazurets // Prykladne prohramne zabezpechennia : zbirnyk naukovykh prats za materialamy desiatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii po prohramuvanniu «UkrPROH2016». – Kyiv, 2016. – S. 237–245.

Рецензія/Peer review : 27.06.2017 р. Надрукована/Printed :09.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

УДК 536.24

А.Я. КАРВАЦЬКИЙ, Г.М. ВАСИЛЬЧЕНКО, К.М. КОРОЛЕНКО
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Т.В. ЧИРКА
ВАТ «Айгама», м. Київ

ВІДНОВЛЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗВОРОТНОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Розглянуто методику числового розв'язання зворотної коефіцієнтної задачі теплопровідності, яка дає змогу одночасно відновлювати дві теплофізичні властивості. Розроблено програмний код для розв'язання зворотної коефіцієнтної задачі теплопровідності для визначення коефіцієнта теплопровідності і масової ізобарної теплоємності сипких вуглецевих матеріалів із використанням експериментальних даних квазістаціонарного методу циліндричного шару або коаксіальних циліндрів.

Ключові слова: зворотна задача теплопровідності, метод коаксіальних циліндрів, коефіцієнт теплопровідності, масова ізобарна теплоємність, градієнтний метод.

A.YA. KARVATSKII, G.M. VASILCHENKO, K.M. KOROLENKO
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
T.V. CHIRKA
PJSC «iGama», Kyiv

RENEWAL OF THERMAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF GRANULAR MATERIALS USING THE INVERSE HEAT CONDUCTION PROBLEM SOLUTION

The methodology of numerical solving of inverse heat conduction problem was considered, enabling to renew 2 thermal and physical properties simultaneously. The programming code for inverse heat conduction problem solving was designed in order to determine the heat conductivity coefficient and mass isobaric thermal capacity of granular carbon materials using the experimental data of quasi-steady method or coaxial cylinders method.

Keywords: heat conductivity inverse problem, coaxial cylinders method, heat conductivity coefficient, mass isobaric thermal capacity, gradient method.

Постановка проблеми

Відомо, що зворотні коефіцієнтні задачі теплопровідності (ЗКЗТ) відносяться до класу некоректно сформульованих задач, в яких порушується причинно-наслідковий зв'язок або третя умова Адамара [1, 2]. Тобто, розв'язок цих задач передбачає знаходження за відомим температурним полем, яке є наслідком, коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності, які є причинами утворення цього температурного поля. Це виникає внаслідок того, що темп зміни температури у віддалених точках від поверхні зразка може бути меншим від темпу зміни температури на його поверхні. Таким чином, порушується неперервна залежність результатів від вихідних температурних даних. Крім того, вихідна інформація для розв'язання ЗКЗТ характеризується шумами (осциляціями) і похибками, які під час розв'язання задачі можуть значно підсилюватися. Необхідно відмітити, що некоректність постановки ЗКЗТ також проявляється у разі визначення двох і більше теплофізичних характеристик, оскільки одному значенню температури відповідає нескінчена множина пар коефіцієнтів, що є порушенням другої умови коректності за Адамаром [3].

Вагомим імпульсом для подолання вказаних проблем та розвитку методів числового розв'язання ЗКЗТ дали роботи А.Н. Тихонова [4]. Введення в його роботах поняття алгоритму регуляризації вихідних даних дало змогу перевести велику кількість некоректних за Адамаром задач у клас умовно коректних і отримати їхні розв'язки.

Застосування ЗКЗТ дає змогу розширити можливості класичних експериментальних квазістаціонарних методів плоского або циліндричного шару, оскільки дає змогу відновити, окрім значення коефіцієнта теплопровідності, величину масової ізобарної теплоємності або температуропровідності досліджуваного матеріалу.

Аналіз попередніх досліджень

Історія активного застосування ЗКЗТ для відновлення теплофізичних властивостей матеріалів налічує понад чотири десятиліття. Але не зважаючи на це в новітній науково-технічній літературі є велика кількість публікацій за цією проблемою. Тобто проблема розв'язання ЗКЗТ залишається актуальною і сьогодні.

Так, наприклад, у статті [5] розглядається постановка зворотних задач теплопровідності як коефіцієнтної зворотної задачі для параболічного рівняння. Запропоновано новий метод узагальнених променів (GR-метод) для розв'язання цієї задачі. Метод базується на зведенні диференціального рівняння в частинних похідних до сімейства звичайних диференціальних рівнянь з використанням локальних трас для функцій і операторів, що розглядаються. GR-метод виражає розв'язок зворотної задачі для цього типу рівнянь за допомогою точних аналітичних формул, в яких використовується пряме та обернене перетворення Родона. Запропонований варіант GR-методу реалізується у вигляді алгоритмів програмного забезпечення, більш швидких порівняно зі всіма відомими, що базуються на традиційних підходах. Це є важливим для використання математичного моделювання під час створення матеріалів зі спеціальними

властивостями теплопровідності.

У праці [6] розглянута нелінійна зворотна задача на базі неоднорідного рівняння теплопровідності з лінійними граничними умовами. Ідентифікована історія поверхневого теплового потоку тіла, що нагрівається. Пропонований метод полягає в апроксимації невідомої функції з використанням кусково-лінійних поліномів, які визначаються послідовно із розв'язання задачі мінімізації на основі даних з надлишковою інформацією. Представлено деякі числові приклади.

У статті [7] вивчається варіаційне формулювання для зворотної задачі теплопровідності. Наведені різні швидкі та ефективні градієнтні методи, що базуються на екстремальному формулюванні. Обговорюється кілька чисельних прикладів.

У статті [8] представлено неперервний метод скінчених елементів з використанням базових функцій Треффтца, що застосовується для прямої і оберненої задач теплопровідності. Для скінченої кількості базових функцій в кожному скінченому елементі (СЕ) поле температури стає розривним на границі між СЕ. Ця неперервність була зменшена за допомогою функції штрафу, яка була додана функціоналу, що оптимізується. Числові значення функцій розподілу ентропії і дисипації енергії були проаналізовані на спільних границях СЕ. Показано, що збільшення кількості базових функцій в СЕ зменшує похибку розв'язання прямої і зворотної задач.

Проблема, що описана в статті [9] відноситься до визначення параметрів охолодження лопаток газових турбін за відомими значеннями розподілу коефіцієнтів тепловіддачі й температури на зовнішній поверхні лопатки. Беручи до уваги, що дві умови задано на одній границі, таке завдання є некоректним за Адамаром. Це означає, що труднощі, пов'язані з розв'язанням таких зворотних задач не залежать від методу, який використовується для цього. У статті наведено розв'язання задачі за допомогою методу граничних елементів на прикладі 2-D багатозв'язаних областей (три канали охолодження лопатки газової турбіни). Отримані числові результати підтверджують ефективність запропонованої методики.

У праці [10] наведено методику розв'язання оберненої задачі, яка базується на аналітичному розв'язку прямої задачі з використанням згортки функцій. Аналітична функція $T(r,t)$ являє собою поверхню, яка визначається за допомогою експериментально виміряних температуру внутрішніх точках тіла. У разі швидко мінливих експериментальних значень, розв'язок оберненої задачі є вельми чутливим до помилок вимірюваних величин. Для того, щоб отримати достовірні результати у роботі був використаний метод згладжування результатів вимірювань за допомогою гіперболічних сплайн-функцій разом з методом послідовного і глобального розв'язання оберненої задачі.

Стаття [11] присвячена питанням коректності деяких обернених задач для математичних моделей, що виникають під час опису процесів тепломасопереносу. За даними першої початково-крайової задачі та умови Неймана на бічній поверхні циліндра відновлюються розв'язок параболічного рівняння другого порядку і коефіцієнт цього рівняння, що належить ядру деякого диференціального рівняння першого порядку і характеризує параметри середовища. Розв'язок рівняння знаходиться в просторі Соболєва з досить великим показником сумарності, а невідомий коефіцієнт у класі неперервних функцій. Показано, що локально за часом задача має єдиний стійкий розв'язок.

У статті [12] представлено оригінальний метод розв'язання багатовимірних зворотних задач теплопровідності. Рівняння теплопровідності у частинних похідних замінюється системою звичайних диференціальних рівнянь залежних від часу, які потім розв'язуються послідовно. Процедура запускається в просторовому вузлі, на якому розташований датчик температури, і послідовно проходить крізь простір до поверхневого вузла. Точність методу демонструється за допомогою порівняння розрахованого поверхневого теплового потоку й температури з відомим точним розв'язком. Виконано два числових експерименти на одновимірній і двовимірній зворотних задачах теплопровідності, для того щоб показати обчислювальну ефективність і точність представленого методу. У третьому прикладі зворотна задача застосована до експериментальних даних. Метод може бути легко розповсюджений на тривимірні задачі.

Загальною науковою проблемою є визначення теплофізичних властивостей нових за складом сипких матеріалів залежно від температури та їх гранулометричного складу, невирішеною частиною наукової проблеми є визначення коефіцієнта теплопровідності та масової ізобарної теплоємності вуглецевих сипких матеріалів залежно від температури та гранулометричного складу з використанням ЗКЗТ, що мають широке застосування в електродній та металургійній галузях промисловості.

Метою статті є застосування зворотної коефіцієнтної задачі теплопровідності для відновлення теплофізичних властивостей сипких вуглецевих матеріалів за експериментальними даними класичного квазістаціонарного методу циліндричного шару або коаксіальних циліндрів.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо математичну постановку прямої задачі нелінійної нестаціонарної теплопровідності для циліндричного шару

$$c_p(t)\rho\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial r}\right],\ r\in(r_1,\ r_2),\ \tau\in(0,\mathrm{T}] \tag{1}$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м^3; t – температура, °С; τ – час, с; r – радіус, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); r_1, r_2 – менший і більший радіуси циліндричного шару, відповідно, м; T – тривалість процесу, с.

Початкові умови для $\tau=0$

$$t(r,0)=t_0(r). \tag{2}$$

Граничні умови для $\tau>0$:

$$\begin{cases} t(r_1,\tau)=t_1(\tau); \\ t(r_2,\tau)=t_2(\tau). \end{cases} \tag{3}$$

Рівняння теплопровідності (1) у разі його запису через коефіцієнт температуропровідності набуває вигляду

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[ra(t)\frac{\partial t}{\partial r}\right],\ r\in(r_1,r_2),\ \tau\in(0,\mathrm{T}], \tag{4}$$

де $a=\dfrac{\lambda}{c_p\rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, м^2/с.

Для замикання системи рівнянь (1)–(3) сформульованої ЗКЗТ потрібно щонайменше додати по одній умові для визначення кожного з невідомих коефіцієнтів λ і c_p (1) для $\tau>0$:

$$\begin{cases} q_E(r_q,\tau)=\dfrac{q_l(\tau)}{2\pi r_q}; \\ t_E(r_t,\tau)=t_t(\tau), \end{cases} \tag{5}$$

де q – густина теплового потоку, Вт/м^2; q_l – лінійна густина теплового потоку, Вт/м; $r_q,r_t\in(r_1,r_2)$ – радіальні координати, в яких визначаються густина теплового потоку й температура всередині циліндричного шару, відповідно, м; E – індекс, який вказує на те, що величини отримані під час фізичного експерименту.

Система рівнянь (1)–(3), (5) є повним математичним формулюванням одновимірної ЗКЗТ для циліндричного шару.

Для числового розв'язання ЗКЗТ використаємо метод послідовної мінімізації неув'язки [13], який базується на градієнтному методі. Цей метод передбачає екстремальне формулювання задачі, використовуючи функціонали неув'язки у вигляді:

$$\begin{cases} F_q(\lambda)=\dfrac{1}{2}\left[q_E(r_q,\tau)-q_M(\lambda,r_q,\tau)\right]^2; \\ F_t(c_p)=\dfrac{1}{2}\left[t_E(r_t,\tau)-t_M(c_p,r_t,\tau)\right]^2; \end{cases} r_q,r_t\in(r_1,r_2),\ \tau\in(0,\mathrm{T}], \tag{6}$$

де M – індекс, що відповідає модельним даним, які описуються (1)–(3); E – індекс, що відповідає експериментальним даним.

Для отримання виразів для ітераційного знаходження коефіцієнтів ЗКЗТ за градієнтним методом послідовної мінімізації неув'язки скористаємося розкладанням функцій $\lambda(q)$ і $c_p(t)$ в ряд Тейлора в околі експериментальних значень q_E і t_E до першого порядку малості:

$$\begin{cases} \lambda(q_E)=\lambda(q_M)+\dfrac{d\lambda(q_M)}{dq_M}(q_E-q_M); \\ c_p(t_E)=c_p(t_M)+\dfrac{dc_p(t_M)}{dt_M}(t_E-t_M). \end{cases} \tag{7}$$

Вирази (7) також можна отримати за допомогою дослідження функціоналів (6) на екстремум $\dfrac{dF_q(\lambda)}{dq_M}=0$ і $\dfrac{dF_t(c_p)}{dt_M}=0$. Далі після деяких перетворень нескладно отримати співвідношення (7).

Метод послідовної мінімізації неув'язки передбачає багатократне розв'язання прямої задачі (1)–(3) на кожному кроці інтегрування за часом. Тому для числової реалізації цього методу скористаємося добре апробованим методом скінченних різниць (МСР). Для цього виконаємо просторово-часову дискретизацію розрахункової області. Для рівномірної сітки будемо мати:

$$\omega_{h\tau}=\left\{(r_i,\tau_j)\right\},\ r_i=r_1+h(i-1),\ \tau_j=\Delta\tau j,\ h=\frac{r_2-r_1}{n-1},\ \Delta\tau=\frac{T}{m}. \tag{8}$$

До рівняння (1) в лінійному його варіанті застосуємо консервативну явно-неявну різницеву схему на шеститочковому шаблоні з другим порядком апроксимації за координатою і часом [14, 15]

$$c_p\rho\left(t_i^{j+1}-t_i^j\right)\frac{\left(r_{i+1/2}^2-r_{i-1/2}^2\right)}{2\Delta\tau}=\frac{1}{2}\left[r_{i+1/2}\lambda\frac{t_{i+1}^{j+1}-t_i^{j+1}}{h}-r_{i-1/2}\lambda\frac{t_i^{j+1}-t_{i-1}^{j+1}}{h}+\right.$$
$$\left.+r_{i+1/2}\lambda\frac{t_{i+1}^{j}-t_i^{j}}{h}-r_{i-1/2}\lambda\frac{t_i^{j}-t_{i-1}^{j}}{h}\right]+O\left(h^2+\Delta\tau^2\right);\quad 2\le i\le n-1,\ 1\le j\le m, \tag{9}$$

де $r_{i+1/2}=\frac{r_i+r_{i+1}}{2},\ r_{i-1/2}=\frac{r_i+r_{i-1}}{2}$, м.

Система дискретних рівнянь (9) розв'язується методом триточкової прогонки [14, 15]. У результаті розв'язання (9) на кожному кроці інтегрування за часом отримуємо поле значень температур, за яким визначаються модельні значення густини теплового потоку й температури в реперних точках, відповідно:

$$\begin{cases} q_M\left(r_q,\tau\right)=q_k^{j+1}+\frac{q_{k+1}^{j+1}-q_k^{j+1}}{h}\left(r_q-r_k\right),\ r_q\in\left(r_k,r_{k+1}\right),\ q_k^{j+1}=\lambda\frac{t_{k+1}^{j+1}-t_{k-1}^{j+1}}{2h};\\ t_M\left(r_t,\tau\right)=t_i^{j+1}+\frac{t_{i+1}^{j+1}-t_i^{j+1}}{h}\left(r_t-r_i\right),\ r_t\in\left(r_i,r_{i+1}\right). \end{cases} \tag{10}$$

Після заміни похідних на скінченні різниці в (7) отримуємо:

$$\begin{cases} \lambda^{l+1}=\lambda^l+\frac{\lambda^l-\lambda^{l-1}}{q_M^l-q_M^{l-1}}\left(q_E-q_M^l\right);\\ c_p{}^{l+1}=c_p{}^l+\frac{c_p{}^l-c_p{}^{l-1}}{t_M^l-t_M^{l-1}}\left(t_E-t_M^l\right), \end{cases} \tag{11}$$

де l – номер ітерації з визначення коефіцієнтів рівняння (9) на кожному кроці інтегрування за часом.

Критерієм закінчення ітерацій на кожному кроці інтегрування за часом рівняння (9) є виконання умови (6) у вигляді

$$\begin{cases} \left|q_E-q_M^l\right|\le\delta_q;\\ \left|t_E-t_M^l\right|\le\delta_t, \end{cases} \tag{12}$$

де δ_q, δ_t – похибки визначення модельних значень густини теплового потоку й температури, відповідно.

У разі відновлення тільки коефіцієнта температуропровідності формулювання ЗКЗТ дещо спрощується і включає рівняння (4) разом з початковими і граничними умовами (2),(3) і однією умовою по температурі в (6), яка необхідна для відновлення коефіцієнта температуропровідності на кожному кроці інтегрування за часом (4).

При цьому дискретний аналог рівняння (4) має вигляд

$$\left(t_i^{j+1}-t_i^j\right)\frac{\left(r_{i+1/2}^2-r_{i-1/2}^2\right)}{2\Delta\tau}=\frac{1}{2}\left[r_{i+1/2}a\frac{t_{i+1}^{j+1}-t_i^{j+1}}{h}-r_{i-1/2}a\frac{t_i^{j+1}-t_{i-1}^{j+1}}{h}+\right.$$
$$\left.+r_{i+1/2}a\frac{t_{i+1}^{j}-t_i^{j}}{h}-r_{i-1/2}a\frac{t_i^{j}-t_{i-1}^{j}}{h}\right]+O\left(h^2+\Delta\tau^2\right);\quad 2\le i\le n-1,\ 1\le j\le m, \tag{13}$$

а співвідношення (11) набуває вигляду

$$a^{l+1}=a^l+\frac{a^l-a^{l-1}}{t_M^l-t_M^{l-1}}\left(t_E-t_M^l\right). \tag{14}$$

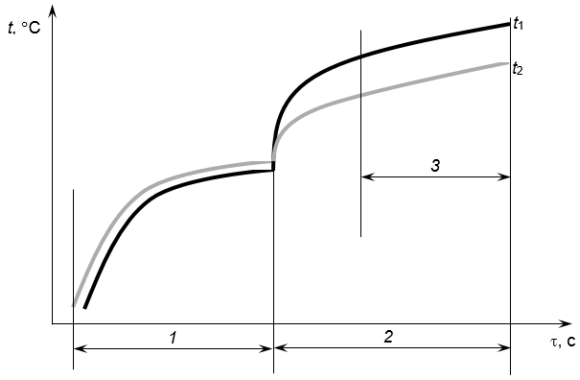
Алгоритм розв'язання ЗКЗТ методом послідовної мінімізації неув'язки у разі відновлення двох коефіцієнтів є таким. За початковий розподіл температури береться стаціонарне поле. Задаються початкові значення коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності. На кожному часовому рівні розглядаються цикл мінімізації неув'язки, в якому спочатку розв'язується пряма задача (9), далі виконується деяке прирощення значення коефіцієнтів і знову розв'язується пряма задача за нових значень коефіцієнтів. Затим розраховуються нові значення коефіцієнтів за (11), розв'язується пряма задача (9) і виконується перевірка збіжності за (12). Цикл продовжується до виконання нерівності (12). Далі відбувається перехід на новий часовий рівень і цикл визначення коефіцієнтів повторюється. У разі відновлення тільки одного коефіцієнта (температуропровідності) алгоритм є практично аналогічним. Різниця полягає лише у формі рівняння прямої задачі (13), для визначення нового значення коефіцієнта температуропровідності використовується (14) і

перевірка збіжності виконується тільки за температурою в (12).

Для розв'язання ЗКЗТ використовувалися експериментальні дані, що були отримані на установці, яка побудована на квазістаціонарному методі циліндричного шару [16, 17] в якій рівень температур забезпечувався фоновими нагрівниками, а перепад температури і вихід на квазістаціонарний режим – центральним нагрівником (рис. 1). При цьому для виконання розрахунків використовувалася тільки квазістаціонарна ділянка розігріву матеріалу. Під час експериментів, окрім граничних температур циліндричного шару, також визначалася температура в середині шару і густина теплового потоку крізь шар.

Для числової реалізації наведеної методики розв'язання ЗКЗТ застосовано програмне середовище Mathcad [18, 19].

Для тестування розглянутої методики розв'язання ЗКЗТ використані експериментальні дані [16, 17], які були проведені на сипкому матеріалі – кам'яновугільному сирому коксі гранулометричним складом 0–10 мм і насипною густиною 600 кг/м^3. Параметри експериментальної комірки методу коаксіальних циліндрів були такими: $d_1 = 26$ мм, $d_2 = 70$ мм – внутрішній та зовнішній діаметри циліндричного шару, відповідно; $d_3 = \sqrt{d_1 d_2}$ – діаметр, за якого контролювалася температура всередині циліндричного шару; $q_l = UI / l$ – лінійна густина теплового потоку крізь циліндричний шар, Вт/м; U – різниця потенціалу на центральному нагрівнику, В; I – сила струму на центральному нагрівнику, А/м^2; l – довжина центрального нагрівника, м.



1 – ділянка нагрівання фоновим нагрівником; 2 – ділянка нагрівання центральним нагрівником; 3 – ділянка квазістаціонарного режиму нагрівання; t_1, t_2 – температури внутрішньої і зовнішньої сторін циліндричного шару, відповідно

Рис. 1. Схема зміни температури на границях циліндричного шару в експериментальній установці

Для розрахунків обрано три ділянки із квазістаціонарним режимом нагрівання циліндричного шару (рис. 2) в інтервалі зміни температур 730–950 °C. Рівень температур вищий за 730 °C був вибраний для того, щоб мінімізувати вплив летючих на результати досліджень.

Порядок розрахунків теплофізичних властивостей на кожній квазістаціонарній ділянці був такий. Спочатку виконується згладжування експериментальних даних (рис. 2), або за допомогою регуляризації за Тихоновим [4], або апроксимації поліномами, або функціями Mathcad [18], наприклад, такими як supsmooth(), ksmooth(). Далі задаються геометричні параметри циліндричного шару, виконується дискретизація розрахункової області за (8), визначається початкове значення розподілу температури із розв'язання стаціонарної задачі типу (9) (коли $c_p = 0$) з використанням експериментальних значень t_1, t_2 (рис. 2) у початковий момент часу і задаються початкові значення теплофізичних коефіцієнтів і похибки визначення модельних значень густини теплового потоку й температури для (12). Потім на кожному кроці інтегрування за часом розв'язується ЗКЗТ за допомогою розв'язання прямої задачі (9) в ітераційному циклі з уточненням значень коефіцієнтів (11). При цьому критерієм закінчення ітерацій на кожному кроці інтегрування за часом є виконання умови (12). Після проведення розрахунків на кожній ділянці квазістаціонарній визначаються середня температура ділянки і відповідні середні значення відновлених коефіцієнтів. При цьому перші три кроки за часом відкидаються, тобто не приймають участь в осередненні.

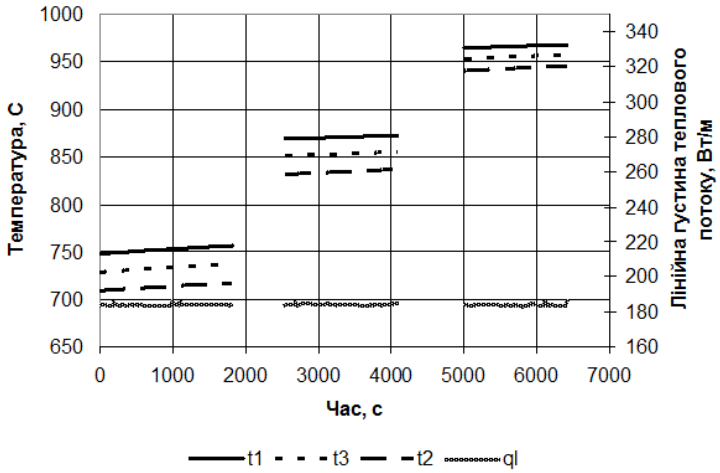
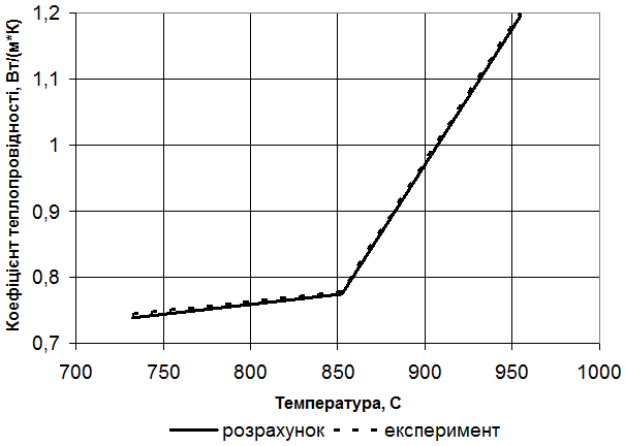
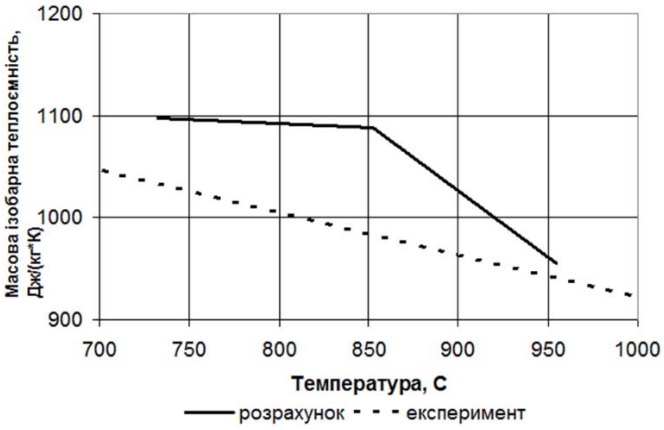


Рис. 2. Експериментальні дані трьох ділянок із квазістаціонарним режимом нагрівання циліндричного шару сипкого матеріалу [16, 17]

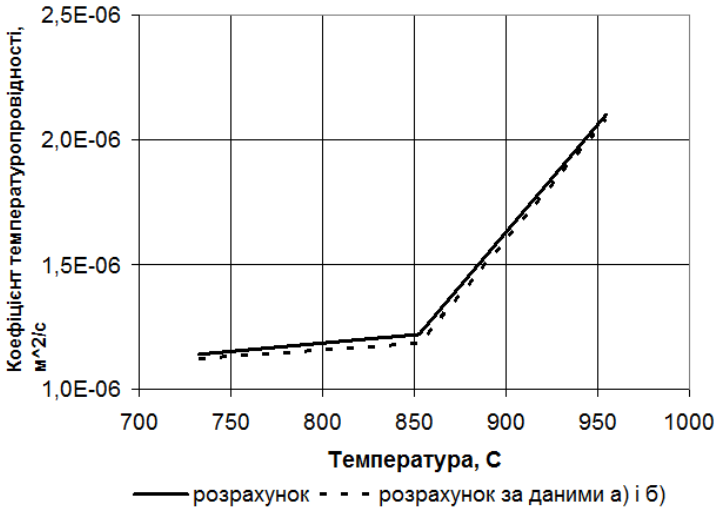
У разі відновлення тільки значення коефіцієнта температуропровідності замість прямої задачі (9) розв'язується задача (13) з уточненням шуканого коефіцієнту за (14) і перевіркою збіжності тільки за температурою в (12). Результати тестування запропонованої методики на даних (рис. 2) та їх порівнянням з експериментом наведено на рис. 3.



а)



б)



в)

а) **коефіцієнт теплопровідності (порівняння з [16, 17]);** ***б)*** **масова ізобарна теплоємність (порівняння з [20]);** ***в)*** **коефіцієнт температуропровідності (порівняння з** $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ **)**

Рис. 3. Результати розв'язання ЗКЗТ

Аналіз отриманих даних (рис. 3) підтверджує працездатність запропонованої методики, оскільки похибка визначення коефіцієнта теплопровідності становить 0,46 %, а масової ізобарної теплоємності – 1,63–10,77 %, що є цілком достатнім для їх використання в інженерних розрахунках промислового обладнання.

Порівняння відновленого значення коефіцієнта температуропровідності (рис. 3, *в*) виконувалося з

використанням формули $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$, де λ і c_p є відновленими значеннями під час їх спільного визначення (рис. 3, *в, б*). Розбіжність між цими даними не перевищує 3 %.

Висновки

Розглянута екстремальна постановка і методика числового розв'язання ЗКЗТ з використанням градієнтного методу для одночасного відновлення λ і c_p, або тільки коефіцієнта температуропровідності. Розроблено відповідне програмне забезпечення у середовищі Mathcad [18].

Виконано тестування розробленої методики на експериментальних даних [16, 17]. Проведено порівняння відновлених значень теплофізичних коефіцієнтів з експериментом.

Похибка визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів за допомогою розв'язання ЗКЗТ не перевищує для коефіцієнта теплопровідності 0,46 % і масової ізобарної теплоємності 1,63–10,77 %, що є цілком достатнім для їх використання в інженерних розрахунках промислового обладнання.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження планується виконати в напрямку визначення впливу летючих на значення теплофізичних властивостей сипучих вуглецевих матеріалів та використати числову методику та розроблений програмний код в експериментальній установці [16, 17] для одночасного відновлення ефективного коефіцієнта теплопровідності разом з масовою ізобарною теплоємністю.

Результати роботи також заплановано використати для дослідження теплофізичних властивостей дрібнозернистого вуглецевого матеріалу під час модернізації технології виробництва ізостатичного графіту.

Література

1. Alifanov O.M. Inverse heat transfer problems / O.M. Alifanov. – New York : Springer-Verlag, 1994. – 348 p.

2. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности / Ю.М. Мацевитый. – К. : Наукова думка, 2002. – Т. 1. Методология. – 405 с.

3. Математичне моделювання температурного поля теплоприймача / В.В. Картузов, К.Б. Ісаєв, В.В. Лукович, П.Г. Круковський // Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. – 2003. – № 6. – С. 169–178.

4. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсений. – М. : Наука, 1979. – 284 с.

5. Алифанов О.М. Быстрое решение обратных задач теплопроводности методом обобщенных лучей и его применение к моделированию наноструктурных материалов / О.М. Алифанов, А.И. Гребенников // Вестник МАИ. Ракетно-космическая техника. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 78–82.

6. Shidfara A. An inverse heat conduction problem with a nonlinear source term / A. Shidfara, G.R. Karamalib, J. Damirchia // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. – 2006. – Vol. 65, Issue 3. – P. 615–621. –DOI: 10.1016/j.na.2005.09.030.

7. Hào D.N. Gradient methods for inverse heat conduction problems / D.N. Hào, H.-J. Reinhardt // Inverse Problems in Science and Engineering. – 1998. – Vol. 6, Issue 3. – P. 177–211. – DOI: 10.1080/174159798088027675.

8. Ciałkowski M.J. Solution of a stationary inverse heat conduction problem by means of Trefftz non-continuous method / M.J. Ciałkowski, A. Frąckowiak, K. Grysa // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50, Issue 11–12. – P. 2170–2181.

9. Frąckowiak A. Numerical solution of a two-dimensional inverse heat transfer problem in gas turbine blade cooling / A. Frąckowiak, M. Ciałkowski, J. Wolfersdorf // Archives of Thermodynamics. – 2006. – Vol. 27, Issue 4. – P. 91–98.

10. Ciałkowski M. A sequential and global method of solving an inverse problem of heat conduction equation / M. Ciałkowski, K. Grysa // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 48, Issue 1. – P. 111–134.

11. Пятков С.Г. О некоторых обратных задачах для математических моделей тепломассопереноса / С.Г. Пятков, А.Г. Боричевская // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2013. – Т. 6, № 4. – С. 63–72.

12. Taler J. Solution of inverse heat conduction problems using control volume approach / J. Taler, W. Zima // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1999. – Vol. 42, Issue 6. – P. 1123–1140. – DOI: 10.1016/S0017-9310(98)00280-4.

13. Никитенко Н.И. Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса / Н.И. Никитенко. – К. : Наукова думка, 1988. – 240 с.

14. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин – М. : Наука, 1979. – 285 с.

15. Карвацький А.Я. Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання : навч. посіб. / А. Я. Карвацький. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 234 с.

16. Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів : моногр. / [Т. В. Чирка, Г. М. Васильченко,

Є. М. Панов та ін.]. – К. : НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка». – 2016. – 152 с.

17. Vasilchenko G.N. Thermal conductivity of carbon-based materials / G.N. Vasilchenko, T.V. Chirka, E.N. Panov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2013. – Vol. 54, Issue 1. – P. 39–43.

18. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations [Electronic resource]. – Access mode: http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/.

19. Karvatskii A. Numerical modeling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation / A. Karvatskii, V. Marchevsky, O. Novokhat // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, No 5(86). – P. 14–22. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96741.

20. Агроскин А.А. Теплоемкость углей / А.А. Агроскин, Е.И. Гончаров // Кокс и химия. – 1965. – № 7. – С. 8–13.

References

1. Alifanov O.M. Inverse heat transfer problems / O.M. Alifanov. – New York : Springer-Verlag, 1994. – 348 p.

2. Matsevytыi Yu.M. Obratnыe zadachy teploprovodnosty / Yu.M. Matsevytыi. – K. : Naukova dumka, 2002. – T. 1. Metodolohyia. – 405 s.

3. Matematychne modeliuvannia temperaturnoho polia teplopryimacha / V.V. Kartuzov, K.B. Isaiev, V.V. Lukovych, P.H. Krukovskyi // Matematychni modeli i obchysliuvalnyi eksperyment v materialoznavstvi. – 2003. – # 6. – C. 169–178.

4. Tykhonov A.N. Metodы reshenyia nekorrektnыkh zadach / A.N. Tykhonov, V.Ya. Arsenyi. – M. : Nauka, 1979. – 284 s.

5. Alyfanov O.M. Bыstroe reshenye obratnыkh zadach teploprovodnosty metodom obobshchennыkh luchei y eho prymenenye k modelyrovanyiu nanostrukturnыkh materyalov / O.M. Alyfanov, A.Y. Hrebennykov // Vestnyk MAY. Raketno-kosmycheskaia tekhnyka. – 2010. – T. 17, # 3. – S. 78–82.

6. Shidfara A. An inverse heat conduction problem with a nonlinear source term / A. Shidfara, G.R. Karamalib, J. Damirchia // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. – 2006. – Vol. 65, Issue 3. – P. 615–621. –DOI: 10.1016/j.na.2005.09.030.

7. Hào D.N. Gradient methods for inverse heat conduction problems / D.N. Hào, H.-J. Reinhardt // Inverse Problems in Science and Engineering. – 1998. – Vol. 6, Issue 3. – P. 177–211. – DOI: 10.1080/174159798088027675.

8. Ciałkowski M.J. Solution of a stationary inverse heat conduction problem by means of Trefftz non-continuous method / M.J. Ciałkowski, A. Frąckowiak, K. Grysa // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50, Issue 11–12. – P. 2170–2181.

9. Frąckowiak A. Numerical solution of a two-dimensional inverse heat transfer problem in gas turbine blade cooling / A. Frąckowiak, M. Ciałkowski, J. Wolfersdorf // Archives of Thermodynamics. – 2006. – Vol. 27, Issue 4. – P. 91–98.

10. Ciałkowski M. A sequential and global method of solving an inverse problem of heat conduction equation / M. Ciałkowski, K. Grysa // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 48, Issue 1. – P. 111–134.

11. Piatkov S.H. O nekotorыkh obratnыkh zadachakh dlia matematycheskykh modelei teplomassoperenosa / S.H. Piatkov, A.H. Borychevskaia // Vestnyk Yuzhno-Uralskoho hosudarstvennoho unyversyteta. – 2013. – T. 6, # 4. – S. 63–72.

12. Taler J. Solution of inverse heat conduction problems using control volume approach / J. Taler, W. Zima // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1999. – Vol. 42, Issue 6. – P. 1123–1140. – DOI: 10.1016/S0017-9310(98)00280-4.

13. Nykytenko N.Y. Sopriazhennыe y obratnыe zadachy teplomassoperenosa / N.Y. Nykytenko. – K. : Naukova dumka, 1988. – 240 s.

14. Tykhonov A.N. Metodы reshenyia nekorrektnыkh zadach / A.N. Tykhonov, V.Ya. Arsenyn – M. : Nauka, 1979. – 285 c.

15. Karvatskyi A.Ya. Modeliuvannia enerhozberihaiuchykh rehlamentiv promyslovoho obladnannia : navch. posib. / A. Ya. Karvatskyi. – K. : NTUU «KPI», 2014. – 234 c.

16. Fizychni vlastyvosti vuhletsevykh sypuchykh materialiv : monohr. / [T. V. Chyrka, H. M. Vasylchenko, Ye. M. Panov ta in.]. – K. : NTUU «KPI» Vyd-vo «Politekhnika». – 2016. – 152 c.

17. Vasilchenko G.N. Thermal conductivity of carbon-based materials / G.N. Vasilchenko, T.V. Chirka, E.N. Panov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2013. – Vol. 54, Issue 1. – P. 39–43.

18. Mathcad. Engineering math software that allows perform, analyze, and share your most vital calculations [Electronic resource]. – Access mode: http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad/.

19. Karvatskii A. Numerical modeling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation / A. Karvatskii, V. Marchevsky, O. Novokhat // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, No 5(86). – P. 14–22. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96741.

20. Ahroskyn A.A. Teploemkost uhlei / A.A. Ahroskyn, E.Y. Honcharov // Koks y khymyia. – 1965. – # 7. – S. 8–13.

Рецензія/Peer review : 13.06.2017 р. Надрукована/Printed :03.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мікульонок І.О.

УДК 004.932.7

Ю.П. КЛЬОЦ, О.В. ІВАНОВ, К.П. НЕГАНОВА
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗІВ НА ОСНОВІ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОКАЗУ ЛІЧИЛЬНИКА НА ЗОБРАЖЕННІ

В статті представлено модель процесу визначення показів лічильників на зображенні лічильника, що дозволяє в режимі реального часу фотографувати та визначати значення показу лічильника на зображенні, отриманого за допомогою фотокамери, встановленої перед лічильником. Модель представлена у вигляді послідовності перетворень фото із зображеним на ньому лічильником, в результаті якого ідентифікуються дані лічильника на зображенні та перетворюються у цифровий формат. Перетворення передбачають виконання матричних операцій згладжування та визначення границь об'єктів над матрицею зображення. Достовірність визначення показів лічильників оцінена за допомогою статистичних даних і складає 86. Такі високі показники дозволяють відмовитись від візуального розпізнавання, натомість використовувати систему для автоматичного зняття показів.

Ключові слова: лічильник, покази, розпізнавання цифр, камера, модель процесу, перетворення зображення.

Y.P. KLOTS, O.V. IVANOV, K.P. NEHANOVA
Khmelnytsky National University

PROCESS MODEL FOR DETERMINING VALUES OF ENERGY METERS BASED ON IMAGE RECOGNITION

The paper presents a process model for determining values of energy meters based on image recognition that allows real-time photographing and recognition of energy meter value on image taken from a photo camera placed in front of an energy meter. The model presented as a sequence of transformations applied to an image with display of energy meter, then identification if data is performed and converted into digital format. Transformations used are matrix-based operations such as of smoothing and determining object borders applied to image matrix. The reliability of determining energy meter values estimated statistically is 86%. This allows giving up of visual determining of energy counter values and using this model instead to automate the process.

Keywords: energy meter, digits identification, camera, process model, image transformation.

Вступ

Зняття показів лічильників – доволі затратний за часом процес. Традиційний спосіб вимагає присутності уповноваженої особи на місці для зняття показів. Крім того процес може ускладнюватись тим, що доступ до лічильника може бути обмежений (за відсутності власника, наприклад).

Для реалізації системи визначення показів лічильників на зображенні потрібно розробити модель для обробки даних на фото із зображенням лічильника.

Постановка задачі: Для розв'язання задачі зняття показів лічильників необхідно розробити модель процесу визначення даних на зображенні, що дозволяє здійснювати ці операції в режимі реального часу.

Модель процесу визначення показів лічильника

Введемо позначення $\rightarrow$, яке позначає відношення між трьома поняттями: $M_1 \overset{S}{\rightarrow} M_2$, де $M_1 M_2$ – це, відповідно, початкова та перетворена моделі, S – функція перетворення моделі.

Представимо модель процесу визначення показів лічильників на зображенні показу у вигляді певної послідовності перетворень зображення показу лічильника:

$$M = M_k \overset{S_1}{\rightarrow} M_{ms} \overset{S_2}{\rightarrow} M_s \overset{S_3}{\rightarrow} M_f \overset{S_4}{\rightarrow} M_b \overset{S_5}{\rightarrow} M_z \overset{S_6}{\rightarrow} M_c \overset{S_7}{\rightarrow} M_v \overset{S_8}{\rightarrow} M_e \overset{S_9}{\rightarrow} M_u \overset{S_{10}}{\rightarrow} M_v \quad 1)$$

Модель кольорового зображення, що місти покази лічильника подаються у вигляді:

$$M_k = V, \quad (2)$$

де V – матриця пікселів кольорового зображення.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n'} \\ v_{21} & \dots & v_{2n'} \\ & v_{ij} & \\ v_{k'1} & \dots & v_{k'n'} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де n', k' – ширина та висота (в пікселях), отриманого з камери зображення відповідно;

v_{ij} – трикомпонентний вектор, що описує колір пікселя у RGB (red, green, blue) з координатами $i = \overline{1, k'}$, $j = \overline{1, n'}$.

Кожен компонент вектора визначає інтенсивність однієї з трьох складових моделі RGB: червоної (red), зеленої (green), синьої (blue).

$$v_{ij} = \left[r_{ij}, \quad g_{ij}, \quad b_{ij} \right], \quad (4)$$

де r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} – значення інтенсивності відповідно червоної, зеленої та синьої компонент кольору пікселя початкового зображення.

Для зменшення використання системних ресурсів обчислювальної техніки доцільним буде масштабувати вихідне зображення.

Надамо модель масштабованого кольорового зображення у вигляді $M_{ms} = H$, де H – матриця пікселів кольорового масштабованого зображення.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & \dots & h_{2n} \\ & h_{ij} & \\ h_{k1} & \dots & h_{kn} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

де n, k – відповідно ширина та висота зображення в пік селях;

h_{ij} – трикомпонентний вектор, що описує колір пікселя з координатами i, j.

Кожен компонент вектора визначає інтенсивність однієї з трьох складових RGB: червону (red), зелену (green), синю (blue).

$$h_{ij} = \left[r_{ij}^h, \quad g_{ij}^h, \quad b_{ij}^h \right], \tag{6}$$

де r_{ij}^h, g_{ij}^h, b_{ij}^h – значення інтенсивності відповідно червоної, зеленої та синьої складових кольору пікселя масштабованого зображення.

Модель процесу масштабування кольорового зображення надамо у вигляді

$$M_k \xrightarrow{S_1} M_{ms}, \tag{7}$$

де S_1 – функція перетворення.

Визначимо S_1 як:

$$r_{ij}^h = \frac{\left(\sum_{m=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{i+1}{k_m}\right]} \sum_{l=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{j+1}{k_m}\right]} r_{ml} \right)}{\left[k_m\right]^2}, \tag{8}$$

$$g_{ij}^h = \frac{\left(\sum_{m=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{i+1}{k_m}\right]} \sum_{l=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{j+1}{k_m}\right]} g_{ml} \right)}{\left[k_m\right]^2}, \tag{9}$$

$$b_{ij}^h = \frac{\left(\sum_{m=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{i+1}{k_m}\right]} \sum_{l=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{j+1}{k_m}\right]} b_{ml} \right)}{\left[k_m\right]^2}, \tag{10}$$

де $\left[r_{ml}, g_{ml}, b_{ml}\right] \in V$ – пікселі вихідного кольорового зображення,

$\left[r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}\right] \in H$ – пікселі масштабованого кольорового зображення,

k_m – коефіцієнт масштабування.

Для проведення аналізу зображення з метою виявлення на ньому об’єктів необхідне перетворення зображення до зображення в тонах сірого кольору.

Модель зображення в тонах сірого представимо у вигляді:

$$M_s = O, \tag{11}$$

де O – матриця пікселів зображення в тонах сірого.

$$O = \begin{bmatrix} o_{11} & \dots & o_{1n'} \\ o_{21} & \dots & o_{2n'} \\ & o_{ij} & \\ o_{k'1} & \dots & o_{k'n'} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

де o_{ij} – значення інтенсивності білого кольору пікселя з координатами i, j.

Модель процесу перетворення кольорового зображення в тони сірого подамо у вигляді:

$$M_{ms} \xrightarrow{S_2} M_s, \tag{13}$$

де S_2 – функція перетворення.

Визначимо S_2 як:

$$r_{ij}k_r + g_{ij}k_g + b_{ij}k_b, \tag{14}$$

де $k_r = 0.2989$, $k_g = 0.5870$, $k_b = 0.1141$ – стандартні вагові коефіцієнти впливу спектральних складових кольору RGB, червоний, зелений та синій відповідно.

Для покращення якості визначення меж символів необхідно вирівняти освітленість зображення, що досягається шляхом формування фонового зображення та віднімання його від основного зображення.

Представимо модель фону зображення у вигляді

$$M_f = F, \tag{15}$$

де F – матриця пікселів фону зображення.

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & \dots & f_{2n} \\ & f_{ij} & \\ f_{k1} & \dots & f_{kn} \end{bmatrix}, \tag{16}$$

де f_{ij} – значення інтенсивності пікселя фонового зображення з координатами i, j.

Модель процесу побудови фонового зображення подамо у вигляді:

$$M_s \xrightarrow{S_3} M_f, \tag{17}$$

де S_3 – функція перетворення.

Визначимо S_3 як:

$$f_{ij} = \frac{\left(\sum_{m=i-\left[\frac{k_f}{2}\right]}^{i+\left[\frac{k_f}{2}\right]} \sum_{l=i-\left[\frac{k_f}{2}\right]}^{j+\left[\frac{k_f}{2}\right]} o_{ml} \right)}{k_f^{\,2}}, \tag{18}$$

де k_f – розмір маски фонового зображення, який повинен бути непарним і складати 10–20% мінімального розміру зображення.

Представимо модель зображення без фону у вигляді:

$$M_f = B, \tag{19}$$

де B – матриця пікселів зображення без фону.

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & \dots & b_{2n} \\ & b_{ij} & \\ b_{k1} & \dots & b_{kn} \end{bmatrix}, \tag{20}$$

де b_{ij} – значення інтенсивності пікселя зображення без фону з координатами i, j.

Модель процесу віднімання фону він зображення в тонах сірого представимо у вигляді:

$$M_f \xrightarrow{S_4} M_b, \tag{21}$$

де S_4 – функція перетворення.

Визначимо S_4 як

$$b_{ij} = \begin{cases} o_{ij} - f_{ij}, \text{ якщо } o_{ij} > f_{ij} \\ 0, \text{ якщо } o_{ij} \le f_{ij} \end{cases}, \tag{22}$$

де o_{ij} – значення інтенсивності білого кольору пікселя з координатами;

i, j, f_{ij} – значення інтенсивності пікселя фонового зображення з координатами i, j.

Використання методів контурного аналізу передбачає попереднє згладжування зображення. Для цього використаємо фільтр Гауса.

Для побудови маски Гауса визначимо функцію Гауса:

$$f_g(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}}, \tag{23}$$

де x, y – координати точки відносно центра матриці,

δ – середньоквадратичне відхилення розподілу Гауса.

На основі функції Гауса побудуємо маску Гауса:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \dots & m_{1y} \\ m_{21} & \dots & m_{2y} \\ & m_{ij} & \\ m_{x1} & \dots & m_{xy} \end{bmatrix}, \tag{24}$$

де m_{ij} – нормована вага пікселя зображення з координатами:

$$m_{ij} = \frac{f_g(r,c)}{\sum_{r=1}^{x}\sum_{c=1}^{y} f_g(r,c)}, \tag{25}$$

де i, j, x, y – розмір маски.

Представимо модель згладженого зображення у вигляді

$$M_z = Z,$$

де Z – матриця пікселів згладженого зображення:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & \dots & z_{2n} \\ & z_{ij} & \\ z_{k1} & \dots & z_{kn} \end{bmatrix}, \tag{26}$$

де z_{ij} – значення інтенсивності пікселя згладженого зображення з координатами i, j.

Модель процесу згладжування зображення подамо у вигляді

$$M_b \xrightarrow{S_5} M_z, \tag{27}$$

де S_5 – функція перетворення.

Визначимо S_5 як:

$$z_{ij} = \sum_{r=(1-x)/2}^{(x-1)/2} \sum_{c=(1-y)/2}^{(y-1)/2} b_{(i+r)(j+c)} m_{rc}, \tag{28}$$

де z_{ij} – значення пікселя згладженого зображення з координатами

i, j, $b_{(i+r)(j+c)}$ – значення пікселя зображення без фону з координатами $i+r, j+c$,

m_{rc} – значення пікселя маски з координатами r, c, x, y – розмір маски.

Представимо контурну модель показу лічильника у вигляді:

$$M_z = C, \tag{29}$$

де C – матриця пікселів зображення, що позначають контури лічильника на зображені показу.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & \dots & c_{2n} \\ & c_{ij} & \\ c_{k1} & \dots & c_{kn} \end{bmatrix}, \tag{30}$$

де c_{ij} – визначає чи належить піксель з координатами i, j контуру лічильника.

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{якщо піксель з координатами } i, j \textit{ належить контуру лічильника} \\ 0, \textit{в іншому випадку} \end{cases} \tag{31}$$

Знаходження контурів цифр доцільно реалізувати за допомогою детектора границь Канні. З цією метою використаємо пару стандартних масок оператора Собеля, що дозволяють визначити градієнт зображення показу лічильника.

$$Mx = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}, \qquad My = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \tag{32}$$

Визначимо в кожній точці Mz значення градієнтів зображення по осях x та y.

Позначимо Gx та Gy матриці відповідних градієнтів:

$$Gx = \begin{bmatrix} g_{11}^x & \cdots & g_{1n}^x \\ g_{21}^x & \cdots & g_{2n}^x \\ & g_{ij}^x & \\ g_{k1}^x & \cdots & g_{kn}^x \end{bmatrix}, \; Gy = \begin{bmatrix} g_{11}^y & \cdots & g_{1n}^y \\ g_{21}^y & \cdots & g_{2n}^y \\ & g_{ij}^y & \\ g_{k1}^y & \cdots & g_{kn}^y \end{bmatrix}, \tag{33}$$

де g_{ij}^x, g_{ij}^y – значення градієнтів до відповідних осей для пікселя з координатами i, j.

$$g_{ij}^x = \sum_{r=-1}^{1} \sum_{c=-1}^{i} z_{(i+r)(j+c)} \times m_{rc}^x \;,\; g_{ij}^y = \sum_{r=-1}^{1} \sum_{c=-1}^{i} z_{(i+r)(j+c)} \times m_{rc}^y \;, \tag{34}$$

де m_{rc}^x, m_{rc}^y – відповідних елементів масок Mx, My.

Визначимо значення модуля градієнта для кожної точки Mz. Позначимо G матриці абсолютних значень градієнта.

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & \cdots & g_{2n} \\ & g_{ij} & \\ g_{k1} & \cdots & g_{kn} \end{bmatrix}, \tag{35}$$

де g_{ij} – абсолютне значення градієнта для пікселя з координатами i, j.

$$g_{ij} = \begin{cases} \left|g_{ij}^x\right| + \left|g_{ij}^y\right|, \text{якщо } \left|g_{ij}^x\right| + \left|g_{ij}^y\right| \geq \min \\ 0, \text{ в інших випадках} \end{cases}, \tag{36}$$

де $\min$ – значення мінімального порогу детектора границь Канні.

З метою визначення напрямку границі лічильника розрахуємо кут її нахилу. Позначимо Θ матрицю розрахованих кутів нахилу контурів.

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1n} \\ \theta_{21} & \cdots & \theta_{2n} \\ & \theta_{ij} & \\ \theta_{k1} & \cdots & \theta_{kn} \end{bmatrix}, \tag{37}$$

де θ_{ij} – кут нахилу границі для пікселя з координатами i, j.

Визначимо значення θ_{ij}, для цього порахуємо значення кута.

$$\alpha_{ij} = arctg\left(\frac{g_{ij}^x}{g_{ij}^y}\right) \; \theta_{ij} = \begin{cases} 45, \text{ якщо } 22{,}5 \leq \alpha_{\text{ij}} < 67{,}5 \\ 90, \text{ якщо } 67{,}5 \leq \alpha_{\text{ij}} < 112{,}5 \\ 135, \text{ якщо } 112{,}5 \leq \alpha_{\text{ij}} < 157{,}5 \\ 0, \text{ при інших значеннях } \alpha_{\text{ij}} \end{cases}, \tag{38}$$

Модель процесу знаходження контуру лічильника на зображенні показу лічильника представимо у вигляді:

$$M_z \xrightarrow{S_6} M_c \,, \tag{39}$$

де S_6 – функція перетворення. Визначимо S_6 як

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } g_{ij} \geq \max \\ 1, \text{ якщо } g_{ij-1} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{ij-1} = 0 \\ 1, \text{ якщо } g_{i-1j-1} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{i-1j-1} = 45 \\ 1, \text{ якщо } g_{i-1j} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{i-1j} = 90 \\ 1, \text{ якщо } g_{i-1j+1} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{i-1j+1} = 135 \\ 1, \text{ якщо } g_{ij+1} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{ij+1} = 180 \\ 1, \text{ якщо } g_{i+1j+1} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{i+1j+1} = 225 \\ 1, \text{ якщо } g_{i+1j} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{i+1j} = 270 \\ 1, \text{ якщо } g_{i+1j-1} = \max(g_{i\pm1 j\pm1}) \text{ та } \theta_{i+1j-1} = 315 \\ 0, \text{ в усіх інших випадках} \end{cases}, \quad (40)$$

З метою змикання частково розірваних контурів лічильника на зображенні показу послідовно виконується операція дилатації та ерозії. Представимо модель замкнених контурів у вигляді

$$M_v = V, \quad (41)$$

де V – матриця пікселів зображення, що позначають замкнені контури лічильника.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & \dots & v_{2n} \\ & v_{ij} & \\ v_{k1} & \dots & v_{kn} \end{bmatrix}, \quad (42)$$

де v_{ij} – ознака належності пікселя з координатами i, j замкненим контурам лічильника.

$$v_{ij} = \begin{cases} 1, \textit{якщо піксель з координатами } i, j \textit{ належить замкненому контуру лічильника} \\ 0, \textit{в інших випадках} \end{cases} \quad (43)$$

Для проведення операції дилатації використаємо матрицю U – матриця пікселів зображення, що позначають потовщені контури цифр.

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & \dots & u_{2n} \\ & u_{ij} & \\ u_{k1} & \dots & u_{kn} \end{bmatrix}, \quad (44)$$

де u_{ij} – ознака належності пікселя з координатами i, j потовщеному контуру лічильника.

Модель процесу замикання контурів лічильника на зображенні показу представимо у вигляді

$$Mc \xrightarrow{S_7} Mv, \quad (45)$$

де S_7 – функція перетворення.

Визначимо S_7 як послідовність кроків:

$$u_{ij} = \max(c_{i-1j-1}, c_{i-1,j}, c_{i-1,j+1}, c_{ij-1}, c_{i,j}, c_{i,j+1}, c_{i+1j-1}, c_{i+1,j}, c_{i+1,j+1}), \quad (46)$$

$$v_{ij} = \min(c_{i-1j-1}, c_{i-1,j}, c_{i-1,j+1}, c_{ij-1}, c_{i,j}, c_{i,j+1}, c_{i+1j-1}, c_{i+1,j}, c_{i+1,j+1}). \quad (47)$$

Позначимо E – тривимірна матриця параметрів кіл:

$$E = \begin{bmatrix} e_{111} \dots & e_{11r,} & \dots & e_{1n1} \dots & e_{1nr} \\ e_{211} \dots & e_{21r,} & \dots & e_{2n1} \dots & e_{2nr} \\ e_{k11} \dots & e_{k1r,} & \dots & e_{kn1} \dots & e_{knr} \end{bmatrix}, \quad (48)$$

де e_{ijl} – кількість точок, що належать колу з центром в точці (i,j) та радіусом l.

Модель процесу визначення кола на зображенні подамо у вигляді:

$$M_v \xrightarrow{S_8} M_e, \quad (49)$$

функція перетворення визначимо S_8 як:

$$e_{ijl} = \sum_{x=1}^{n}\sum_{y=1}^{k} U_{xy} * \begin{cases} 1, якщо\ (x-i)^2 + (y-j)^2 - l^2 < 1 \\ 0, інакше \end{cases}, \quad (50)$$

Визначимо R_x, R_y – координати та R – радіус табло круглого лічильника.

Довжина кола круглого табло лічильника за умови, що табло займає не менше 80% ширини (висоти) екрану складе:

$$l = \min(n,k) * \pi * 0.8, \quad (51)$$

де n,k – розміри U.

Враховуючи похибку розпізнавання контуру можна стверджувати про наявність круглого табло на зображенні, якщо $\max(E) > l*0.75$, тоді $R_x = x_{max}(E)$, $R_y = y_{max}(E)$, $R = R_{max}(E)$, в іншому випадку на зображенні немає круглого табло або воно займає менше 80%.

Позначимо E' – матриця параметрів прямих:

$$E' = \begin{bmatrix} e'_{11} \dots & e'_{12} \\ e'_{n1} \dots & e'_{n2} \end{bmatrix},, \quad (52)$$

де e'_{ij} – кількість точок контурів прямокутного табло,

i – довжина перпендикуляра від початку координат до прямої,

j – кут між перпендикуляром і віссю Ox ($1-0°, 2-90°$)

Модель процесу визначення прямокутника на зображенні подамо у вигляді:

$$M_e \xrightarrow{S_9} M_u, \quad (53)$$

Функцію перетворення визначимо S_9 як :

$$e_{ijl} = \sum_{x=1}^{n}\sum_{y=1}^{k} U_{xy} * \begin{cases} 1, якщо\ x * \cos j + y * \sin j - i < 1 \\ 0, інакше \end{cases}, \quad (54)$$

Визначимо межі прямокутного табло на зображенні U. Довжина горизонтальних меж табло, за умови, що воно не менше 80% ширини (висоти екрану) складе:

$$l = n*0.8, \quad (55)$$

Враховуючи похибку розпізнавання контуру можна стверджувати про наявність прямокутного табло на зображенні, якщо $\max h(E) > l*0.75$ (верхня границя) та $\max l(E) > l*0.75$ (нижня границя)

Тоді $y_h = y \max h(E)$, $y_l = y \max l(E)$, $x_l = x \max L(E)$, $x_r = x \max R(E)$

У випадку, якщо форма лічильника не визначена, потрібно отримати нове зображення.

Модель процесу визначення зображення табло лічильника подамо у вигляді

$$M_u \xrightarrow{S_{10}} M_w, \quad (56)$$

де S_{10} – функція перетворення.

Модель зображення табло лічильника представлено у вигляді $M_w = W, T$, де W – зображення лічильника, T – форма лічильника. $T = \{\text{прямокутний, круглий}\}$

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1\,x\,max} \\ w_{y\,max1} & \dots & w_{x\,max\,y\,max} \end{bmatrix},, \quad (57)$$

де w_{ij} :

$$w_{ij} = u_{(xl+i)(yh+j)}, \quad (58)$$

де $i = \overline{1, x_2 - x_l}$;

$j = \overline{1, y_h - y_l}$;

Впорядкуємо розміри елементів W до висоти 300 пікселів.

W' – змасштабоване W,

де

$$w'_{ij} = \frac{\left(\sum_{m=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{i+1}{k_m}\right]} \sum_{l=\left[\frac{i}{k_m}\right]}^{\left[\frac{j+1}{k_m}\right]} w_{ml} \right)}{\left[k_m\right]^2}, \quad (59)$$

Позначимо M_1 – множина еталонних зображень.

$$M_1 =< W', T,\ M_2 >, \tag{60}$$

де M_2 – марка, $|M_2|$ = k – кількість типів лічильників.

Позначимо M_3 –множина лічильників:

$$M_3 =< K_p, m, K_n, n, S >, \tag{61}$$

де K_p – координати зони показів лічильника,

m – кількість розрядів,

K_n – координати зони номера лічильника,

n – номер лічильника,

S – марка лічильника.

$$S = \min_K \left(\sum_{i,j} \left| w'_{ij} - w_{ij}^{M_1} \right| \right), \tag{62}$$

Оцінка достовірності моделі процесу визначення показів лічильників

Для оцінки точності розпізнавання показів лічильників було обрано статистичний мето. В ході проведення оцінки було опрацьовано 50 зображень. Результати програмного розпізнавання порівнювались із результатами візуального розпізнавання людиною.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця

	Програмне розпізнавання		Візуальне розпізнавання	
	Абсолютне значення (шт.)	Відносне значення (%)	Абсолютне значення (шт.)	Відносне значення (%)
Тип лічильника	47	94	50	100
№ лічильника	46	92	50	100
Показ лічильника	43	86	46	92

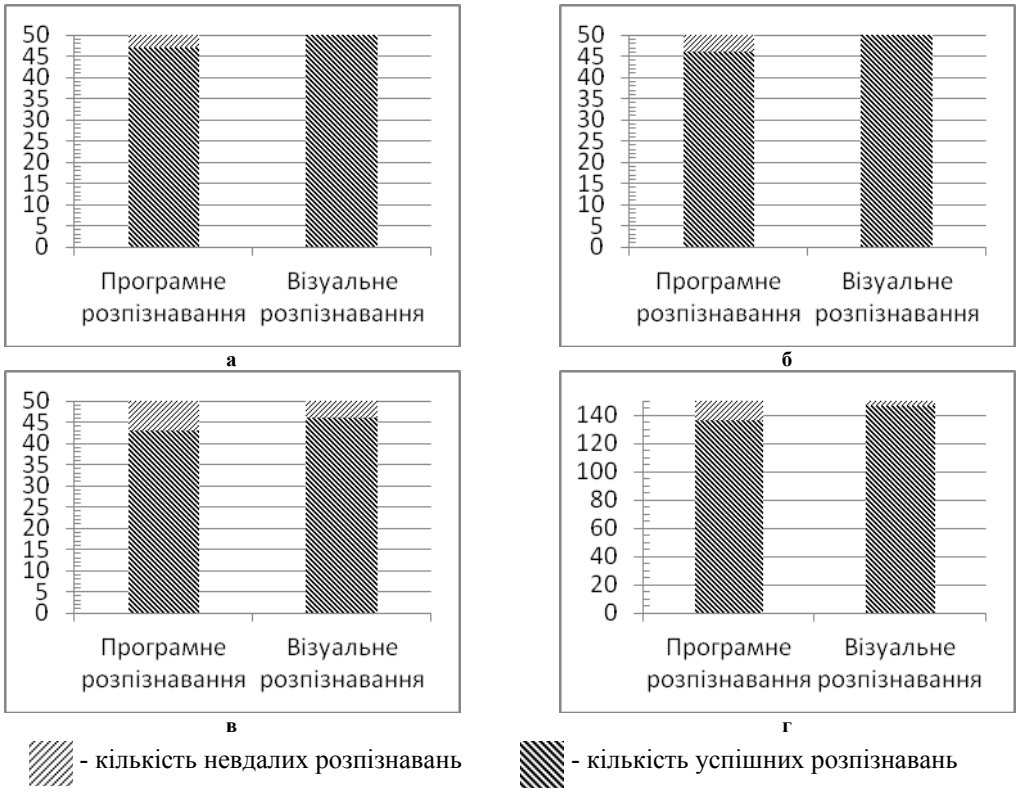


Рис. 1. Діаграма відношення кількості успішних до кількості невдалих розпізнавань для категорій: а) тип лічильника; б) № лічильника; в) показ лічильника; г) загальна кількість

Оцінивши достовірність, яка складає 86% для визначення показів лічильників, можна запропонувати модель (1) для впровадження автоматичного збору показів лічильників.

Висновки. Запропонована модель системи автоматичного визначення показів лічильників на основі

розпізнавання показу на зображенні, дозволяє визначати показ лічильника із достовірністю 86%. В процесі використовуються методи векторного перетворення зображення показу лічильника, що, в свою чергу, дозволяє оптимізувати програмне забезпечення за рахунок використання багатоядерних процесорів.

Література

1. Кльоц Ю.П. Модель процесу визначення геометричних характеристик бульок на зображенні піни / Ю.П. Кльоц, А.О. Грищук // Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 223–229.

2. Кльоц Ю.П. Система ідентифікації бульок на зображенні піни / Ю.П. Кльоц // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали 14-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2012, Київ, 24 квітня 2012 р. / ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ". – К. : ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2012. – 357 с.

3. Кльоц Ю. П. Метод ідентифікації бульок піни на зображеннях/ Ю.П. Кльоц // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 2. – С. 200–205.

References

1. Klots Y.P., Gryschuk A.O. Process model for the geometrical characteristics determining of the bubbles on the foam image, Herald of Khmelnytsky National University. Technical sciences. Khmelnitsky. – 2013. – Volume 6. – P. 200–205.

2. Klots Y.P. System identification bubbles on the image of foam. System Analysis and Information technologies: Materials of the 14th International scientific and technical conference SAIT 2012. Kyiv. 2012. p. 357.

3. Klots Y.P. The method bubbles identification in the images of foam, Herald of Khmelnytsky National University. 2012, Volume 2, pp. 200–205.

4. Kozlenko M., Kuz M. Joint capturing of read outs of household power supply meters. In Proceedings of the 13th International Conference TCSET 2016: Modern Problems of RadioEngineering, Telecommunications and Computer Science, Lviv-Slavsko. 2016. pp. 755–757.

Рецензія/Peer review : 11.05.2017 р. Надрукована/Printed :07.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

УДК 621.317.73

Д.А. МАКАРИШКІН, Н.М. САМАРУК
Хмельницький національний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАСИВНОГО ФІЛЬТРА НИЖНІХ ЧАСТОТ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГУЛЯРНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

В статті наведено математичну модель пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі та представлені аналітичні вирази для визначення елементів вдосконаленої еквівалентної схеми заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі. Отримано операторну функцію опору еквівалентної схеми заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі у вигляді неперервного дробу та дробово-раціональної функції. Запропоновані аналітичні вирази для визначення нулів та полюсів операторної функції опору у вигляді дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі.

Ключові слова: математична модель, пасивний фільтр нижніх частот, регулярна лінія передачі, моделювання, еквівалентна схема заміщення.

D.A. MAKARYSHKIN, N.M. SAMARUK
Khmelnytsky National University

MATHEMATICAL MODEL OF THE PASSIVE LOW-PASS FILTER USING REGULAR TRANSMISSION LINE

The paper presents the mathematical model of the passive low-pass filter using regular transmission line. Developed improved equivalent circuit and modified nonlinear equivalent circuit of the passive low-pass filter using regular transmission line in a continuous fractional scheme, which is synthesized by a second form of Kauer. Presented analytical expressions for the determination of elements of the modified equivalent circuit and elements improved equivalent circuit of the passive low-pass filter using regular transmission line. The obtained the operator-valued impedance functions of the passive low-pass filter using regular transmission line in the form of a continued fraction and fractional-rational function, for which the positive real coefficients polynomials of the numerator and denominator are functions of the regular transmission line parameters. The proposed analytical expressions for the determination zeros and poles of the operator-valued impedance functions in the form of a fractional-rational function of the passive low-pass filter using regular transmission line.

Keywords: mathematical model, passive low-pass filter, regular transmission line, modelling, equivalent circuit.

Постановка проблеми. Пасивні прилади є важливою складовою частиною компонентної бази сучасної радіоелектронної апаратури. Вони виконують різні функції по обробці сигналів: ділення, додавання, фазовий зсув, узгодження та задане розузгодження, трансформацію хвильових опорів, фільтрацію та інші функції. Оптимізація амплітудно-частотних фазо-частотних характеристик функціональних приладів в максимально можливому широкому робочому діапазоні не втрачає своєї актуальності. Найбільш перспективними для досягнення максимально можливої широкої робочої смуги частот є базові елементи, які створюють структури пасивних функціональних приладів. До них відносяться відрізки одиночних та зв'язаних регулярних ліній передачі з Т – хвилями. Особливий інтерес представляє синтез та моделювання пасивних фільтрів низької частоти з використанням регулярної лінії передачі [1].

В [1] встановлено, що моделювання пасивних фільтрів нижньої частоти з використанням регулярної лінії передачі здійснюються на моделях з зосередженими параметрами, користуючись еквівалентною схемою заміщення чотириполюсника Т-подібною або П-подібною. Також моделювання пасивних фільтрів нижньої частоти з використанням регулярних ліній передачі здійснюється ланковою схемою, яка представляє собою каскадне включення декількох симетричних однакових чотириполюсників [1].

Недоліком Т-подібної або П-подібної еквівалентної схеми пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі є те, що параметри такого чотириполюсника можуть бути розраховані тільки на фіксованій частоті та їхній розрахунок обмежений граничною довжиною [1].

Недоліком використання ланкової моделі для моделювання пасивних фільтрів нижньої частоти з використанням регулярної лінії передачі є обмежений частотний діапазон. В ланковому еквіваленті спостерігається експоненціальне зменшення амплітуди сигналу від каскаду до каскаду, яке пов'язано не з ефектом омічних втрат, а з виникненням розузгодження окремих елементарних каскадів пасивного чотириполюсника [1].

Тому розробка математичної моделі пасивних фільтрів низької частоти з використанням регулярної лінії передачі є актуальною науковою задачею і має важливе значення для підвищення ефективності проектування та

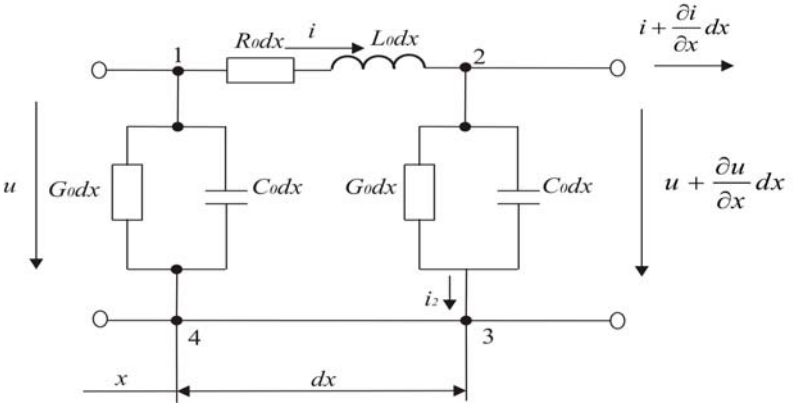


Рис. 1. Схема заміщення регулярної лінії передачі довжиною dx

покращення характеристик цього класу пристроїв.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Регулярну 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].

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 по першому закону Кіргофа для вузла 2 і по другому закону Кіргофа для контура 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 по синусоїдальному закону з кутовою швидкістю ω. Користуючись комплексним методом, представимо рівняння лінії для комплексних діючих напруг $\dot{U}$ та $\dot{I}$ [1–3]:

$$\begin{cases} -\dfrac{d\dot{U}}{dx} = \left(R_0 + j\omega L_0\right)\dot{I}, \\ -\dfrac{d\dot{I}}{dx} = \left(G_0 + j\omega C_0\right)\dot{U}. \end{cases} \tag{2}$$

Комплексні $\dot{U}$ та $\dot{I}$ є функціями тільки x, і, відповідно, рівняння в часткових похідних для миттєвих u та i перейшли в звичайні диференційні рівняння для $\dot{U}$ та $\dot{I}$.

Виразимо комплексну амплітуду струму $\dot{I}$ у першому рівнянні через комплексну амплітуду напруги $\dot{U}$ із другого рівняння, а комплексну амплітуду напруги $\dot{U}$ у другому рівнянні через комплексну амплітуду струму $\dot{I}$ із першого рівняння. Отримаємо систему регулярних лінійних диференційних рівнянь другого порядку (3) для елементарної ділянки dx [1–3].

$$\begin{cases} \dfrac{d^2\dot{U}}{dx^2} = \gamma^2 \dot{U}, \\ \dfrac{d^2\dot{I}}{dx^2} = \gamma^2 \dot{I}. \end{cases} \tag{3}$$

де $\gamma = \sqrt{\left(R_0 + j\omega L_0\right)\left(g + j\omega C_0\right)} = \alpha + j\beta$ – коефіцієнт розповсюдження лінії, α – коефіцієнт затухання, β – коефіцієнт фази.

Загальний розв'язок першого однорідного лінійного диференційного рівняння другого порядку із системи (3) шукають для $\dot{U}$ елементарної ділянки dx у вигляді (4) [1–3].

$$\dot{U} = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x}. \tag{4}$$

де A_1 та A_2 – константи інтегрування.

Якщо підставити вираз комплексної напруги $\dot{U}$ (4) у перше рівняння системи (2), то можна отримати вираз для комплексної амплітуди струму $\dot{I}$ елементарної ділянки регулярної лінії передачі dx (5) [1–3].

$$\dot{I} = \frac{1}{\underline{Z}}\left(A_1 e^{-\gamma x} - A_2 e^{\gamma x}\right). \tag{5}$$

де $Z = \sqrt{\dfrac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$ – хвильовий або характеристичний опір лінії.

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 ($\dot{I}_2, \dot{U}_2$).

Для визначення постійних інтегрування A_1 та A_2 достатньо знати дві з цих чотирьох величин.

Виразимо ці постійні через напругу $\dot{U}_1$ та струм $\dot{I}_1$ на початку лінії при $x=0$

$$\dot{U}_1 = A_1 + A_2 \text{ та } \dot{I}_1 = \frac{1}{Z}(A_1 + A_2);$$

$$A_1 = \frac{1}{2}\left(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z\right) \text{ та } A_2 = \frac{1}{2}\left(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z\right).$$

Тоді

$$\begin{cases} \dot{U} = \frac{1}{2}\left(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z\right)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}\left(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z\right)e^{\gamma x}; \\ \dot{I} = \frac{1}{Z}[\frac{1}{2}\left(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z\right)e^{-\gamma x} - \frac{1}{2}\left(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z\right)e^{\gamma x}]. \end{cases} \quad (6)$$

Ці вирази для напруги $\dot{U}$ і струму $\dot{I}$ в будь-якій точці регулярної лінії передачі можна записати також в іншій формі, використовуючи співвідношення:

$$\frac{1}{2}\left(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}\right) = ch\gamma x \text{ та } \frac{1}{2}\left(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}\right) = sh\gamma x.$$

Отримаємо

$$\dot{U} = \dot{U}_1 ch\gamma x - \dot{I}_1 Z sh\gamma x; \;\; \dot{I} = \dot{I}_1 ch\gamma x - \frac{\dot{U}_1}{Z} sh\gamma x.$$

Значення напруги та струму в кінці лінії отримують, якщо прийняти $x=l$:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 ch\gamma l - \dot{I}_1 Z sh\gamma l; \;\; \dot{I}_2 = \dot{I}_1 ch\gamma l - \frac{\dot{U}_1}{Z} sh\gamma l.$$

З цих рівнянь можна визначити $\dot{I}_1, \dot{U}_1$ через $\dot{I}_2, \dot{U}_2$. Маємо

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 ch\gamma l + \dot{I}_2 Z sh\gamma l, \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{Z} sh\gamma l + \dot{I}_2 ch\gamma l. \end{cases} \quad (7)$$

Порівнюючи рівняння регулярної лінії передачі (7) з рівняннями чотириполюсника в А-параметрах (7) [4, 5]

$$\begin{cases} U_1 = AU_2 + BI_2, \\ I_1 = CU_2 + DI_2. \end{cases} \quad (8)$$

можна зробити висновок, що регулярна лінія передачі – це симетричний чотириполюсник, коефіцієнти якого

$$A = D = ch\gamma l, \quad (9)$$

$$B = Z sh\gamma l, \quad (10)$$

$$C = \frac{sh\gamma l}{Z}. \quad (11)$$

Для симетричного пасивного чотириполюсника рівняння зв'язку коефіцієнтів системи рівнянь в А-формі

$$AD - BC = ch^2\gamma l - sh^2\gamma l = 1. \quad (12)$$

Як і будь-який чотириполюсник, пасивний фільтр низької частоти з використанням регулярної лінії передачі може бути замінений Т- або П-подібною, в даному випадку еквівалентною схемою. Параметри еквівалентних схем обчислюються через постійні A, B, C та D [5, 6].

Метою статті є розробка математичної моделі пасивних фільтрів низької частоти з використанням регулярної лінії передачі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для підвищення точності математичного опису параметрів і характеристик пасивних фільтрів нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі автори пропонують використовувати наступний підхід [1]:

1. Враховуючи, що $x' = l - x$ (x' – відстань від кінця регулярної лінії передачі) представити систему рівнянь (7) у наступному вигляді

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_{вих} + Z\dot{I}_{вих}}{2} e^{\gamma(l-x)} + \frac{\dot{U}_{вих} - Z\dot{I}_{вих}}{2} e^{-\gamma(l-x)}, \\ \dot{I}_1 = \frac{1}{Z}\left(\frac{\dot{U}_{вих} + Z\dot{I}_{вих}}{2} e^{\gamma(l-x)} - \frac{\dot{I}_{вих} - Z\dot{I}_{вих}}{2} e^{-\gamma(l-x)}\right). \end{cases} \quad (13)$$

2. Враховуючи, що вихідний опір регулярної лінії передачі

$$Z_{вих} = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{I}_{вих}}. \tag{14}$$

після математичних перетворень отримаємо систему виразів (15) для комплексної амплітуди напруги $\dot{U}$ та струму $\dot{I}$ у будь-якій точці регулярної лінії передачі.

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dfrac{\dot{U}_{вих} + Z\dot{I}_{вих}}{2}\left(e^{\gamma x'} + \dfrac{Z_{вих} - Z}{Z_{вих} + Z}e^{-\gamma x'}\right), \\ \dot{I}_1 = \dfrac{\dot{U}_{вих} + Z\dot{I}_{mвих}}{2Z}\left(e^{\gamma x'} - \dfrac{Z_{вих} - Z}{Z_{вих} + Z}e^{-\gamma x'}\right). \end{cases} \tag{15}$$

3. Визначити комплексний вхідний опір $Z_{вх}$ регулярної лінії передачі у будь-якій довільній точці на відстані x' від кінця регулярної лінії передачі

$$Z_{вх}(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z\frac{e^{\gamma x'} + \dfrac{Z_{вих} - Z}{Z_{вих} + Z}e^{-\gamma x'}}{e^{\gamma x'} - \dfrac{Z_{вих} - Z}{Z_{вих} + Z}e^{-\gamma x'}}, \tag{16}$$

В режимі холостого ходу, коли $Z_{вих} = \infty$, рівняння (16) можна записати у вигляді (17).

$$Z_{вх} = Zcth\gamma x'. \tag{17}$$

Зробимо заміну Z та γ їх виразами. В результаті отримаємо вираз (18), який відповідає еквівалентній схемі заміщення регулярної лінії передачі

$$Z_{вх}(j\omega) = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}}cth\left(\sqrt{Z_0Y_0}x'\right) = \frac{\sqrt{R_0 + j\omega L_0}}{\sqrt{G_0 + j\omega C_0}}cth\left(\sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}x'\right). \tag{18}$$

У виразі комплексного вхідного опору (18) гіперболічний котангенс представити у вигляді неперервного дробу використовуючи наступне співвідношення

$$cthx = \frac{1}{x} + \cfrac{1}{\cfrac{3}{x} + \cfrac{1}{\cfrac{5}{x} + \cfrac{1}{\cfrac{7}{x} + \cfrac{1}{\cfrac{9}{x} + \cfrac{1}{\cfrac{11}{x} + \cfrac{1}{\cfrac{13}{x} + \cfrac{1}{\cfrac{15}{x} + \ldots}}}}}}}. \tag{19}$$

Тоді

$$Z_{вх}(j\omega) = \frac{\sqrt{Z_0}}{\sqrt{Y_0}}\left(\frac{1}{\sqrt{Z_0Y_0}x'} + \cfrac{1}{\cfrac{3}{\sqrt{Z_0Y_0}x'} + \cfrac{1}{\cfrac{5}{\sqrt{Z_0Y_0}x'} + \cfrac{1}{\cfrac{7}{\sqrt{Z_0Y_0}x'} + \cfrac{1}{\cfrac{9}{\sqrt{Z_0Y_0}x'} + \cfrac{1}{\cfrac{11}{\sqrt{Z_0Y_0}x'} + \cfrac{1}{\cfrac{13}{\sqrt{Z_0Y_0}x'} + \ldots}}}}}}\right), \tag{20}$$

після математичних перетворень отримаємо

$$Z_{вх}(j\omega)=\frac{1}{Y_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{3}{Z_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{5}{Y_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{7}{Z_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{9}{Y_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{11}{Z_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{13}{Y_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{15}{Z_0x'}+\ldots}}}}}}}. \quad (21)$$

Вираз (21) представимо у вигляді співвідношення (22)

$$Z_{вх}(j\omega)=\frac{1}{Y_0x'}+\cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0x'}{3}}+\cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Y_0x'}{5}}+\cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0x'}{7}}+\cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Y_0x'}{9}}+\cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0x'}{11}}+\cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Y_0x'}{13}}+\cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0x'}{15}}+\ldots}}}}}}}. \quad (22)$$

5. Використовуючи вираз комплексного опору $Z_{вх}$ у вигляді неперервного дробу (22) побудувати еквівалентну схему заміщення, яка відповідає неперервній дробовій схемі по другій формі Кауера (рис. 2) [6].

Аналізуючи вдосконалену еквівалентну схему заміщення регулярної лінії передачі, можна записати вирази для визначення елементів цієї схеми через її погонні параметри Z_0 та Y_0

$$Y_n=\frac{Y_0x'}{n},\ n=1, 5, 9, 13, 17, 21,\ldots. \quad (23)$$

для повздовжніх елементів

$$Z_n=\frac{Z_0x'}{m},\ \text{m=3, 7, 11, 15, 19, 23,}\ldots. \quad (24)$$

для поперечних елементів

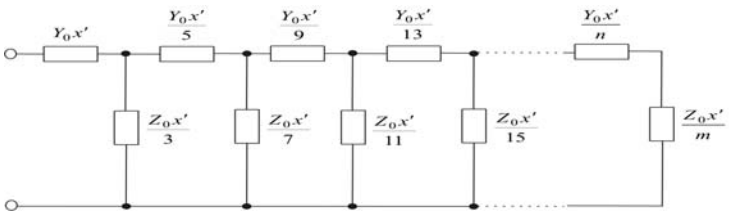


Рис. 2. Модифікована еквівалентна схема заміщення регулярної лінії передачі у вигляді неперервної дробової схеми, яка синтезована по другій формі Кауера

Вирази (23) та (24) можна представити у вигляді загальних співвідношень (25) та (26) відповідно

$$Y_n=\frac{Y_0x'}{4n-3}\ \text{при}\ n\geq 2 \quad (25)$$

$$Z_n=\frac{Z_0x'}{4n-5}\ \text{при}\ n\geq 2 \quad (26)$$

З урахуванням, того що $Z_0=R_0+j\omega L_0$ та $Y_0=G_0+j\omega C_0$ формули (25) та (26) отримують наступний вигляд

$$Y_n=\frac{Y_0x'}{4n-3}=\frac{(G_0+j\omega C_0)x'}{4n-3}=\frac{G_0x'+j\omega C_0x'}{4n-3}=\frac{G_0x'}{4n-3}+j\omega\frac{C_0x'}{4n-3}\ \text{при}\ n\geq 2 \quad (27)$$

$$Z_n=\frac{Z_0x'}{4n-5}=\frac{(R_0+j\omega L_0)x'}{4n-5}=\frac{R_0x'+j\omega L_0x'}{4n-5}=\frac{R_0x'}{4n-5}+j\omega\frac{L_0x'}{4n-5}\ \text{при}\ n\geq 2 \quad (28)$$

Звідки можна визначити параметри запропонованої еквівалентної схеми заміщення регулярної лінії передачі через її первині параметри

$$R_n = \frac{R_0 x'}{4n-5}, \tag{29}$$

$$L_n = \frac{L_0 x'}{4n-5}, \tag{30}$$

$$G_n = \frac{G_0 x'}{4n-3}, \tag{31}$$

$$C_n = \frac{C_0 x'}{4n-3}, \tag{32}$$

Такий результат відповідає безпосередньо заміні відрізку лінії передачі довжиною x' еквівалентними його елементами з зосередженими параметрами – повздовжніми провідністю $G_n x'$ та ємністю $C_n x'$, поперечними опором $R_n x'$ та індуктивністю $L_n x'$. З урахуванням цього вдосконалена еквівалентна схема для моделювання пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі представлена на рис.3.

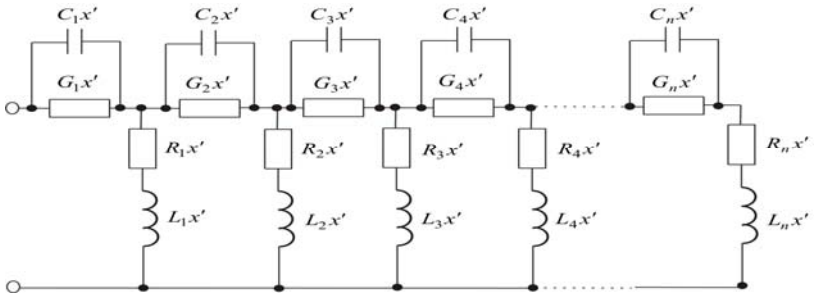


Рис. 3. Вдосконалена еквівалентна схема для моделювання пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі

5. Функцію комплексного опору (22) вдосконаленої еквівалентної схеми заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використання регулярної лінії передачі необхідно представити в операторній формі, зробивши заміну $j\omega=p$. Тоді операторна функція опору буде мати наступний вигляд (33)

6.

$$Z_{вх}(p) = \frac{1}{Y_0(p)x'} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0(p)x'}{3}} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Y_0(p)x'}{5}} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0(p)x'}{7}} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Y_0(p)x'}{9}} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0(p)x'}{11}} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Y_0(p)x'}{13}} + \cfrac{1}{\cfrac{1}{\cfrac{Z_0(p)x'}{15}} + \dots}}}}}}}}, \tag{33}$$

де $Z_0(p) = R_0 + pL_0$, $Y_0(p) = G_0 + pC_0$.

7. Опускаючи складні математичні перетворення отримаємо операторну функцію опору (33) у вигляді дробово-раціональної функції (34)

$$Z_{вх}(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_k p^k + b_{k-1} p^{k-1} + \dots + b_1 p + b_0}, \tag{34}$$

де $a_n, a_{n-1}, \dots a_1, a_0$ – позитивні дійсні коефіцієнти поліному чисельника операторної функції опору, які є функціями погонних параметрів регулярної лінії передачі ; $b_k, b_{k-1}, \dots b_1, b_0$ – позитивні дійсні коефіцієнти поліному знаменника операторної функції опору, які є функціями погонних параметрів регулярної лінії передачі.

Реалізація операторної функції опору (34) заснована на її розкладанні чи на прості дроби (метод Фостера), чи у неперервні дроби (метод Кауера) [2–6].

8. Реалізуючи операторну функцію опору у вигляді дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі (34) методом Фореста необхідно знайти її нулі та полюси. Для цього поліном чисельника та знаменника операторної функції опору (34) представимо виразами (35) та (36) відповідно

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = p^n + \alpha_1 p^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} p + \alpha_n \tag{35}$$

$$b_k p^k + b_{k-1} p^{k-1} + \dots + b_1 p + b_0 = p^k + \beta_1 p^{k-1} + \dots + \beta_{k-1} p + \beta_k \tag{36}$$

Згідно з [7] запишемо наступні функції

$$\frac{1}{1+\alpha_1 p+\alpha_2 p^2+\ldots+\alpha_n p^n}=1+c_1 p+c_2 p^2+\ldots+c_m p^m \ldots, \tag{37}$$

$$\frac{1}{1+\beta_1 p+\beta_2 p^2+\ldots+\beta_k p^k}=1+d_1 p+d_2 p^2+\ldots+d_l p^l \ldots. \tag{38}$$

Коефіцієнти α_n в (35) та (37), а також β_k в (36) та (38) співпадають. Коефіцієнти c_m та d_l послідовностей (37) і (38) можуть бути знайденні із лінійного рекурентного рівняння

$$c_m=-(\alpha_1 c_{m-1}+\alpha_2 c_{m-2}+\ldots+\alpha_n c_{m-n}),\ c_0=1,\ c_1=-\alpha_1, \tag{39}$$

$$d_l=-(\beta_1 d_{l-1}+\beta_2 d_{l-2}+\ldots+\beta_k d_{l-k}),\ d_0=1,\ d_1=-\beta_1. \tag{40}$$

Визначаючи нулі та полюса дробово-раціональної функції (34), необхідно знайти корні алгебраїчних рівнянь (41) та (42) відповідно

$$p^n+\alpha_1 p^{n-1}+\ldots+\alpha_{n-1}p+\alpha_n=0, \tag{41}$$

$$p^k+\beta_1 p^{k-1}+\ldots+\beta_{k-1}p+\beta_k=0. \tag{42}$$

Для цього автори пропонують використати формули Ейткена [7–9]:

а) вирази (43)–(46) для знаходження нулів поліному чисельника дробово-раціональної функції (34)

$$p_1=\lim_{m\to\infty}\frac{c_{m+1}}{c_m}, \tag{43}$$

$$\lim_{m\to\infty}\left(\frac{\begin{vmatrix} c_{m+1} & c_{m+2}\\ c_{m+2} & c_{m+3}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_m & c_{m+1}\\ c_{m+1} & c_{m+2}\end{vmatrix}}:\frac{c_{m+1}}{c_m}\right)=\frac{p_1 p_2}{p_1}=p_2, \tag{44}$$

$$\lim_{m\to\infty}\left(\frac{\begin{vmatrix} c_{m+1} & c_{m+2} & c_{m+3}\\ c_{m+2} & c_{m+3} & c_{m+4}\\ c_{m+3} & c_{m+4} & c_{m+5}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_m & c_{m+1} & c_{m+2}\\ c_{m+1} & c_{m+2} & c_{m+3}\\ c_{m+2} & c_{m+3} & c_{m+4}\end{vmatrix}}:\frac{\begin{vmatrix} c_{m+1} & c_{m+2}\\ c_{m+2} & c_{m+3}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_m & c_{m+1}\\ c_{m+1} & c_{m+2}\end{vmatrix}}\right)=\frac{p_1 p_2 p_3}{p_1 p_2}=p_3, \tag{45}$$

$$\ldots$$

$$p_n=\lim_{m\to\infty}\left(\frac{\begin{vmatrix} c_{m+1} & c_{m+2} & \cdots & c_{m+n}\\ c_{m+2} & c_{m+3} & \cdots & c_{m+n+1}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ c_{m+n} & c_{m+n+1} & \cdots & c_{m+2n-1}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_m & c_{m+1} & \cdots & c_{m+n-1}\\ c_{m+1} & c_{m+2} & \cdots & c_{m+n}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ c_{m+n-1} & c_{m+n} & \cdots & c_{m+2n-2}\end{vmatrix}}:\frac{\begin{vmatrix} c_{m+1} & c_{m+2} & \cdots & c_{m+n-1}\\ c_{m+2} & c_{m+3} & \cdots & c_{m+n}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ c_{m+n-1} & c_{m+n} & \cdots & c_{m+2n-3}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_m & c_{m+1} & \cdots & c_{m+n-2}\\ c_{m+1} & c_{m+2} & \cdots & c_{m+n-1}\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ c_{m+n-2} & c_{m+n-1} & \cdots & c_{m+2n-4}\end{vmatrix}}\right). \tag{46}$$

б) вирази (47)–(50) для знаходження полюсів поліному знаменника дробово-раціональної функції (34)

$$p_1=\lim_{l\to\infty}\frac{d_{l+1}}{d_l}, \tag{47}$$

$$\lim_{l\to\infty}\left(\frac{\begin{vmatrix} d_{l+1} & d_{l+2}\\ d_{l+2} & d_{l+3}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} d_l & d_{l+1}\\ d_{l+1} & d_{l+2}\end{vmatrix}}:\frac{d_{l+1}}{d_l}\right)=\frac{p_1 p_2}{p_1}=p_2, \tag{48}$$

$$\lim_{l\to\infty}\left(\frac{\begin{vmatrix} d_{l+1} & d_{l+2} & d_{l+3} \\ d_{l+2} & d_{l+3} & d_{l+4} \\ d_{l+3} & d_{l+4} & d_{l+5} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} d_{l} & d_{l+1} & d_{l+2} \\ d_{l+1} & d_{l+2} & d_{l+3} \\ d_{l+2} & d_{l+3} & d_{l+4} \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} d_{l+1} & d_{l+2} \\ d_{l+2} & d_{l+3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} d_{l} & d_{l+1} \\ d_{l+1} & d_{l+2} \end{vmatrix}}\right) = \frac{p_1 p_2 p_3}{p_1 p_2} = p_3 \ , \tag{49}$$

$$\dots$$

$$p_k = \lim_{l\to\infty}\left(\frac{\begin{vmatrix} d_{l+1} & d_{l+2} & \dots & d_{l+k} \\ c_{l+2} & c_{l+3} & \dots & c_{l+k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{l+k} & d_{l+k+1} & \dots & d_{l+2k-1} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} d_{l} & d_{l+1} & \dots & d_{l+k-1} \\ d_{l+1} & d_{l+2} & \dots & d_{l+k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{l+k-1} & d_{l+k} & \dots & d_{l+2k-2} \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} d_{l+1} & d_{l+2} & \dots & d_{l+k-1} \\ d_{l+2} & d_{l+3} & \dots & d_{l+k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{l+k-1} & d_{l+k} & \dots & d_{l+2k-3} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} d_{l} & d_{l+1} & \dots & d_{l+k-2} \\ d_{l+1} & d_{l+2} & \dots & d_{l+k-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{l+k-2} & d_{l+k-1} & \dots & d_{l+2k-4} \end{vmatrix}}\right). \tag{50}$$

Тут $|p_1| \ge |p_2| \ge |p_3| \ge \dots \ge |p_n|$ для нулів та $|p_1| \ge |p_2| \ge |p_3| \ge \dots \ge |p_k|$ для полюсів дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі (34). Однак, недолік формул Ейткена, полягає, у тому що, використовуючи їх можна знаходити тільки дійсні нулі та полюса дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі (34). Спосіб знаходження старших за модулем дійсних нулів та полюсів дробово-раціональної функції (34), які описуються виразами (43) та (47), як відомо, належать Д. Бернуллі.

Застосуємо запропонований у [7, 8] *r/φ* – алгоритм сумування розбіжних неперервних дробів до визначення комплексних нулів та полюсів дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі (34).

Запишемо вирази (43)–(46) для знаходження нулів поліному чисельника та вирази (47)–(50) для знаходження полюсів поліному знаменника дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі (34) у розгорнутому вигляді. У результаті нескладних перетворень отримаємо конструкції із співвідношень визначників матриць Теплиця, діагональними елементами яких є коефіцієнти вихідних рівнянь (41) та (42) [7, 8].

Вираз (43) можна представити співвідношенням визначників (51):

$$p_1 = -\frac{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}}, \tag{51}$$

Наступні нулі поліному чисельника дробово-раціональної функції (34) записуються наступним чином:

$$p_2 = -\frac{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}}, \tag{52}$$

$$p_3 = -\frac{\begin{vmatrix} -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 & -\alpha_7 & \dots \\ -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ . & . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 & \dots \\ -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & -\alpha_6 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ . & . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & -\alpha_5 & \dots \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 & \dots \\ -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}, \tag{53}$$

.....

$$p_n = -\frac{\begin{vmatrix} -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & -\alpha_{n+2} & -\alpha_{n+3} & \dots \\ -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & -\alpha_{n+2} & \dots \\ -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & \dots \\ -\alpha_{n-3} & -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & -\alpha_{n+2} & \dots \\ -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & \dots \\ -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & -\alpha_{n+2} & \dots \\ -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & \dots \\ -\alpha_{n-3} & -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & \dots \\ -\alpha_{n-4} & -\alpha_{n-3} & -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & -\alpha_{n+1} & \dots \\ -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & -\alpha_n & \dots \\ -\alpha_{n-3} & -\alpha_{n-2} & -\alpha_{n-1} & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}}. \tag{54}$$

Вираз (47) можна представити співвідношенням визначників (55):

$$p_1 = -\frac{\begin{vmatrix} -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\beta_1 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\beta_1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}}, \tag{55}$$

Наступні полюса поліному знаменника дробово-раціональної функції (34) записуються наступним чином:

$$p_2 = -\frac{\begin{vmatrix} -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & \dots \\ -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\beta_1 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}}, \tag{56}$$

$$p_3 = -\frac{\begin{vmatrix} -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & -\beta_6 & -\beta_7 & \dots \\ -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & -\beta_6 & \dots \\ -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ . & . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & -\beta_6 & \dots \\ -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & \dots \\ -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & -\beta_6 & \dots \\ -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ . & . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & -\beta_5 & \dots \\ -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & -\beta_4 & \dots \\ -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 & \dots \\ 0 & -1 & -\beta_1 & -\beta_2 & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}, \tag{57}$$

……

$$p_k = -\frac{\begin{vmatrix} -\beta_k & -\beta_{k+1} & -\beta_{k+2} & -\beta_{k+3} & \dots \\ -\beta_{k-1} & -\beta_k & -\beta_{k+1} & -\beta_{k+2} & \dots \\ -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & -\beta_k & -\beta_{k+1} & \dots \\ -\beta_{k-3} & -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & -\beta_k & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\beta_k & -\beta_{k+1} & -\beta_{k+2} & \dots \\ -\beta_{k-1} & -\beta_k & -\beta_{k+1} & \dots \\ -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & -\beta_k & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} -\beta_{k-1} & -\beta_k & -\beta_{k+1} & -\beta_{k+2} & \dots \\ -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & -\beta_k & -\beta_{k+1} & \dots \\ -\beta_{k-3} & -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & -\beta_k & \dots \\ -\beta_{k-4} & -\beta_{k-3} & -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & \dots \\ . & . & . & . & \dots \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -\beta_{k-1} & -\beta_k & -\beta_{k+1} & \dots \\ -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & -\beta_k & \dots \\ -\beta_{k-3} & -\beta_{k-2} & -\beta_{k-1} & \dots \\ . & . & . & \dots \end{vmatrix}}. \tag{58}$$

Відношення визначників (51)–(58) виражають нулі та полюса дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі (34) через коефіцієнти алгебраїчних рівнянь (41) та (42). Ці коефіцієнти, які є функціями погонних параметрів регулярної лінії передачі називають функціями $P_i^{(n)}$ нулів та $P_i^{(k)}$ полюсів дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі і позначають наступним чином

$$P_i^{(n)} = P_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n), \tag{59}$$

$$P_i^{(k)} = P_i(\beta_1, \beta_2, \dots \beta_k). \tag{60}$$

Нескладно по виразам (51)–(58) записати аналітичні вирази для представлення корнів алгебраїчних рівнянь (41) та (42) шостої, сьомої, і, в загалі, довільної степені *n* поліному чисельника та довільної степені *k* поліному знаменника дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі через коефіцієнти вихідного рівняння (41) та (42) [7].

Для комплексних нулів та полюсів дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі, які визначаються по виразам (51)–(58), безпосередньо обчислити їх значення неможливо. В цьому випадку необхідно додатково використати *r/φ*- алгоритм. Модуль шуканих комплексних нулів та полюсів дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі визначаються за виразами (61) та (62) відповідно [7]:

$$r_i = \lim_{z \to \infty} \sqrt[z]{\prod_{m=1}^{z} \left| P_{im}^{n} \right|}, \tag{61}$$

$$r_j = \lim_{z \to \infty} \sqrt[z]{\prod_{m=1}^{z} \left| P_{im}^{k} \right|}. \tag{62}$$

де P_{im}^{n} – *m*-й відповідний дріб виразів (51)–(54), P_{im}^{n} – *m*-й відповідний дріб виразів (55)–(58).

Аргумент шуканих комплексних нулів та полюсів дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі визначаються за виразами (63) та (64) відповідно [7]:

$$\left| \varphi_i \right| = \pi \lim_{z \to \infty} \frac{K_{zn}}{z}, \tag{63}$$

$$\left| \varphi_j \right| = \pi \lim_{z \to \infty} \frac{K_{zk}}{z}. \tag{64}$$

де K_{zn} – число від'ємних відповідних дробів із *z* відповідних дробів P_{iz}^{n}, K_{zk} – число від'ємних

відповідних дробів із z відповідних дробів P_{iz}^{k}.

Висновки. Вибрано адекватну математичну модель пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі, яка складається із еквівалентної схеми заміщення та функції комплексного опору. Функцію комплексного опору еквівалентної схеми заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі можна записати у вигляді неперервного дробу. Побудовано модифіковану еквівалентну схему заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі у вигляді неперервної дробової схеми, яка синтезована по другій формі Кауера.

Розроблена вдосконалена еквівалентна схема пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі.

Отримано аналітичні вирази для визначення елементів модифікованої ї еквівалентної схеми заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі у вигляді неперервної дробової схеми, яка синтезована по другій формі Кауера та елементів вдосконаленої еквівалентної схеми заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі.

Отримано операторну функцію опору еквівалентної схеми заміщення пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі у вигляді неперервного дробу та дробово-раціональної функції, для якої позитивні дійсні коефіцієнти поліномів чисельника і знаменника є функціями погонних параметрів регулярної лінії передачі.

Встановлено, що реалізація операторної функції опору у вигляді дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі заснована на її розкладанні чи на прості дроби (метод Фостера), чи у неперервні дроби (метод Кауера).

Запропоновані аналітичні вирази для визначення нулів та полюсів операторної функції опору у вигляді дробово-раціональної функції пасивного фільтра нижніх частот з використанням регулярної лінії передачі.

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. – 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. Шмойлов В.И. Решение алгебраических уравнений непрерывными дробями / В.И. Шмойлов, В.Б. Коваленко // Искусственный интеллект. – 2011. – № 1. – С. 260–270.
8. Aitken A. On Bernoulli's numerical solution of algebraic equations / A. Aitken // Proc. Roy. Soc, Edinburgh, Ser. A, 46 (1925/26). – P. 289–305.
9. Шмойлов В.И. Непрерывные дроби : [в 3 т. Т.1] / Шмойлов В.И. – Львов : Меркатор, 2004. – 645 с.

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 Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 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. Shmoilov V.Y. Reshenye alhebraycheskykh uravnenyi nepreryvnymy drobiamy / V.Y. Shmoilov, V.B. Kovalenko // Yskusstvennyi yntellekt. – 2011. – # 1. – S. 260–270.
8. Aitken A. On Bernoullis numerical solution of algebraic equations / A. Aitken // Proc. Roy. Soc, Edinburgh, Ser. A, 46 (1925/26). – P. 289–305.
9. Shmoilov V.Y. Nepreryvnye droby : [v 3 t. T.1] / Shmoilov V.Y. – Lvov : Merkator, 2004. – 645 s.

Отримана/Received : 16.4.2017 р. Надрукована/Printed :14.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

УДК 004.056.55

С.Д. ГАЛЮК, О.В. КРУЛІКОВСЬКИЙ, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ, ГЕНЕРОВАНИХ ХАОТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ТРАТАСА

В роботі досліджено властивості часових рядів гіперхаотичного відображення Тратаса. Використовуючи біфуркаційні діаграми та спектр показників Ляпунова, виявлено наявність неперервних за зміною параметрів керування хаотичних та гіперхаотичних режимів коливань. Встановлено, що за типом функції нелінійного перетворення система Тратаса еквівалентна двом тентовим відображенням, які об'єднані взаємними оберненими зв'язками. Показано можливість отримання хаотичних дискретних часових рядів з рівномірним розподілом. Проведено оцінку можливості встановлення розмірності хаотичної системи засобами рекурентного аналізу. Виявлено, що на основі залежності ентропії розподілу діагоналей рекурентної діаграми можливо оцінити нижню межу розмірності фазового простору системи.

Ключові слова: гіперхаотичне відображення, рекурентний аналіз, біфуркаційна діаграма.

S.D. HALIUK, O.V. KRULIKOVSKYI, L.F. POLITANSKYI
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

ANALYSIS OF TIMESERIES GENERATED BY TRATAS CHAOTIC SYSTEM

In this work we have studied the qualities of timeseries of Tratas hyper-chaotic map. Using bifurcation diagram and spectrum of Lyapunov exponents, we have found the existence of continuous for the change of control parameters of chaotic and hyper-chaotic oscillations modes. It is found, that Tratas system for the type of the nonlinear transformation function is equivalent to two tent maps, coupled by feedback. There is shown an opportunity to get chaotic discrete timeseries with even distribution. There is evaluated an opportunity to set dimension of chaotic system using recurrent analysis tools. It is revealed that the dependence of the entropy of distribution on the diagonals of recurrent diagram helps to estimate lower limit of phase space dimension of the system.

Keywords: hyper-chaotic map, recurrent analysis, bifurcation diagram.

Вступ

Використання дискретних відображень в якості базових для побудови генераторів псевдовипадкових та випадкових послідовностей [1, 2] є одним із основних напрямків досліджень в галузі застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях [3, 4]. При схемотехнічній реалізації генераторів хаотичних коливань спектральні і статистичні характеристики коливань визначатимуться параметрами схеми (номіналами елементів). Внаслідок впливу теплових шумів та технологічних обмежень на прецизійність елементів електричних кіл виникає проблема встановлення стійкої завадозахищеної синхронізації, оскільки для побудови системи зв'язку необхідно використовувати два ідентичні генератори. Тому синхронізація таких генераторів може бути досягнута тільки тоді, коли вони будуть близькими за параметрами, розкид яких не перевищує 1 %. Реалізація ідентичних генераторів можлива в інтегральному виконанні з лазерною підгонкою на інтегральній мікросхемі [5]. При виході з ладу одного з генераторів заміні підлягатимуть обидва.

Технологічна складність забезпечення ідентичності рознесених генераторів хаотичних коливань обмежує їх застосування в системах зв'язку. Одним із шляхів вирішення проблеми забезпечення прецизійності елементної бази є апаратна реалізація генераторів хаотичних коливань з використанням програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). Перехід до скінченої множини дискретних станів призводить до деградації динаміки і циклічності хаотичних рядів, що суттєвим недоліком програмних рішень [6, 7]. При цьому розв'язки зберігатимуть властивості фазового простору, розмірності, спектру та ін., проте будуть циклічними. В [8] показано, що довжина циклів значно менша, ніж потужність множини можливих станів системи, і залежить від кореляційної розмірності та точності обчислень. Різні початкові умови призводять до однакових циклів, що обмежує їх кількість. Для окремих систем можливе явище колапсу хаосу, яке полягає у встановленні циклу, тривалістю в одну ітерацію [9]. Уникнути негативного впливу деградації системи можна збільшенням періоду повторення її розв'язків, що досягається шляхом використання багатовимірних хаотичних відображень. З'єднання кількох систем за допомогою кільцевого або перехресного зв'язку дає змогу задавати розмірність системи і кількість її параметрів, відкриває можливість отримання неперервної біфуркаційної діаграми та складних послідовностей, що задовольняють критерії випадковості.

Задача аналізу експериментальних часових рядів хаотичних систем здійснюється з метою класифікації процесів, виявлення закономірностей їх поведінки, оцінки складності і випадковості сигналів, і забезпечується застосуванням нелінійних методів фрактального, мультифрактального та рекурентного аналізу [11–13].

Метою роботи є дослідження динамічних режимів роботи системи Тратаса з використанням біфуркаційних діаграм та спектру показників Ляпунова, аналіз статистичних характеристик часових рядів, оцінка можливостей застосування методів рекурентного аналізу для встановлення розмірності багатовимірної системи.

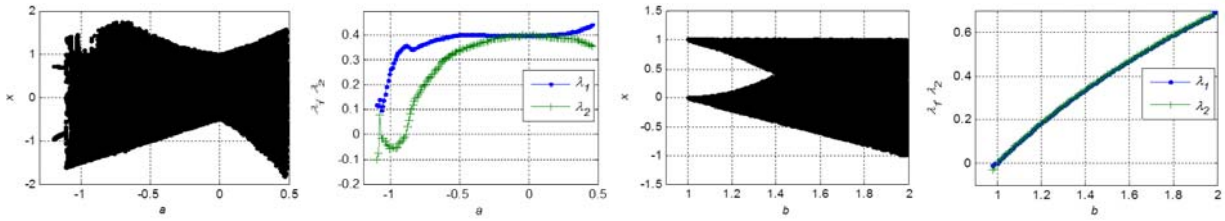
Гіперхаотична система Тратаса

Система Тратаса в загальному вигляді є двомірним відображенням, що описується наступною формулою [7, 10]:

$$\begin{cases} x(n+1) = a_1 x(n) - b_1 \left| y(n) \right| + 1, \\ y(n+1) = a_2 y(n) - b_2 \left| x(n) \right| + 1, \end{cases} \quad (1)$$

де a_1, a_2, b_1 і b_2 – параметри системи.

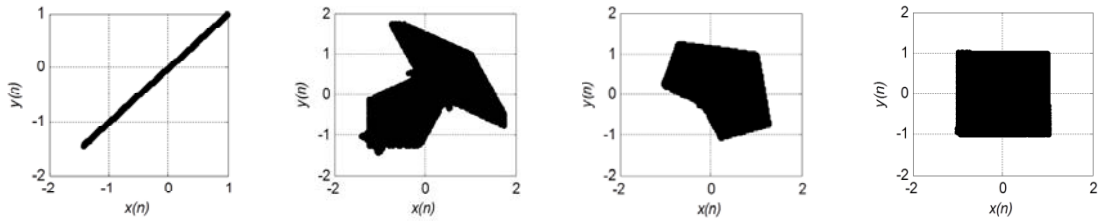
Відображення (1) залежно від параметрів керування може бути хаотичним та гіперхаотичним. Біфуркаційна діаграма та залежність показників Ляпунова приведені на рис. 1.



а б в г

Рис. 1. Двовимірне відображення: біфуркаційна діаграма – (*а*); залежність показників Ляпунова від *a* при $b = 1,493$ – (*б*); біфуркаційна діаграма – (*в*); залежність показників Ляпунова від *b* при $a = 0,01$ – (*г*)

Як випливає з рис. 1 *а* та 1 *в,* гіперхаотичні коливання мають місце в широкому неперервному діапазоні значень параметрів керування. При $a = [-1;\ 0,48]$ і $b =$ 1.493 та в $b = [1,42;\ 1,989]$ і $a =$ 0,01 вікна періодичності не виявлено. Розподіл значень реалізацій, генерованих (1), є неперервним між мінімальними та максимальними значеннями. Приклади фазових портретів для (1) в режимі неперіодичних автоколивань приведено на рис. 2. При $a = -0,95$, $b = 1,493$ два рівняння в (1) можна розглядати як окремі незалежні, ідентичні системи із повною синхронізацією, оскільки їхні коливання є ідентичними, що випливає з рис. 2 *а*.

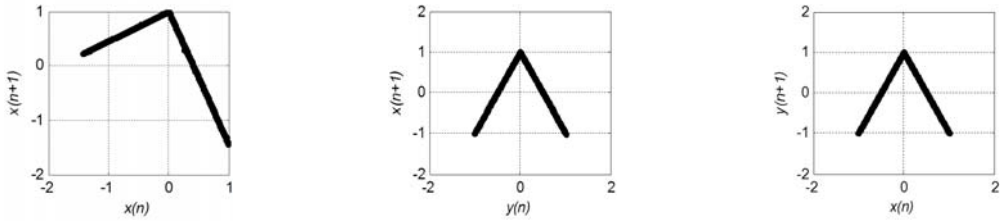


а б в г

Рис. 2. Фазовий портрет відображення (1): хаотичний режим при $a = -0,95$, $b = 1,493$ – (*а*); гіперхаотичний режим при *a*=-0,75, $b = 1,493$ – (*б*); $a = 0,23$, $b = 1,493$ – (*в*); $a = 0,01$, $b = 1,98$ – (*г*)

Якщо $a = -0,95$ та $b = 1,493$ один із показників Ляпунова є додатнім $\lambda_1 = 0,33$, інший є від'ємним $\lambda_2 = -0,048$, що вказує на встановлення режиму хаотичних коливань в системі. Із збільшенням значення параметру до $a = -0,75$ при $b = 1,493$ показники Ляпунова є додатними і дорівнюють $\lambda_1 = 0,69$, $\lambda_2 = -0,21$, що вказує на встановлення в системі режиму гіперхаосу, за якого фазовий портрет має вигляд, приведений на рис 2 *б.* Для додатних значень параметру *a* має місце гіперхаос (рис. 2 *в*).

У гіперхаотичному режимі при $a \to 0$, $b = 2 - a \to 2$ обидва показники Ляпунова є майже ідентичними і прямують до максимально можливих значень $\lambda_1, \lambda_2 \to \ln 2$. На рис. 2 *г* фазовий портрет має форму квадрату, рівномірно заповненого точками, що свідчить про статистичну незалежність двох реалізацій $x(n)$ і $y(n)$.

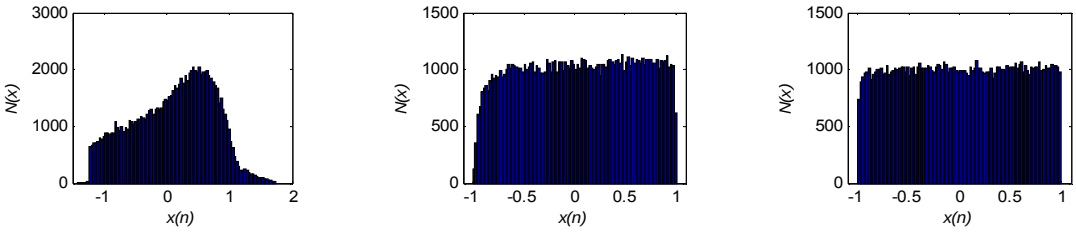


а б в

Рис. 3. Графічне представлення функції нелінійного перетворення при $a = -0,95$, $b = 1,493$ для *x*(*n*+1) та *x*(*n*)– (*а*); при

$a=0,01$, $b=1,98$ **– для *x*(*n*+1) та *y*(*n*) - (*б*); і для *y*(*n*+1) та *x*(*n*) - (*в*)**

Нелінійна функція перетворення $x(n+1)=f(x(n))$ є кусково-лінійним відображенням, що складається із двох лінійних ділянок (рис. 3 *а*). Детальний аналіз ітераційних діаграм (рис. 3 *б, в)* дозволяє зробити висновок, що система (1) за типом функції нелінійного перетворення еквівалентна двом тентовим відображенням, які з'єднані слабким зворотнім зв'язком у формі доданків $ax(n)$ і $ay(n)$.



а **б** **в**

Рис. 4. Гістограма розподілу значень часових рядів генерованих (1): при $a=-0,75$, $b=1,493$ - (*а*); при $a=0,01$, $b=1,98$ - (*б*); при $a=0,0001$, $b=1,998$ – (*в*)

Гістограми розподілу часових рядів системи (1) визначаються її параметрами (рис. 4). При $a=-0,0001$ і $b=1,998$ гістограма розподілу є близькою до рівномірної (рис. 4 *в*). Зменшення зв'язку між підсистемами, в міру наближення значень параметрів до граничних $a\to 0$, $b=2-a\to 2$ дає змогу отримати рівномірний розподіл вихідних реалізацій.

Система (1) приваблива можливістю її трансформації до багатовимірного відображення за допомогою з'єднання кільцевим зв'язком:

$$\begin{cases} x_1(n+1)=a_1|x_1(n)|-b_1|x_2(n)|+1 \\ x_2(n+1)=a_2|x_2(n)|-b_2|x_3(n)|+1 \\ \vdots \\ x_d(n+1)=a_d|x_d(n)|-b_d|x_1(n)|+1 \end{cases} \quad (2)$$

де d – розмірність системи. Довільне збільшення розмірності системи вказує на потенційну здатність породжувати складні хаотичні ряди для генераторів ПВП.

Рекурентний аналіз системи Тратаса

Хаотичні відображення еволюціонують в обмеженій області фазового простору, тому характеризуються ергодичністю і частковим повторенням ділянок траєкторій, що відображається у формі і структурі атрактора системи. За визначенням траєкторії хаотичної системи ніколи перетинаються, проте можуть як завгодно близько наближатися одна до одної. При аналізі часових рядів таких систем подібність ділянок траєкторій можна виявити за допомогою рекурентного аналізу. Згідно теореми Танкеса на основі однієї часової реалізації $x=\{x_1,x_2,\ldots,x_N,\}$ можна побудувати траєкторію у псевдофазовому просторі розмірності *m*, що зберігає характеристики оригінальної системи, тобто:

$$\begin{aligned} x_1^m &= \{x_1,x_2,\ldots,x_{N-m},\} \\ x_2^m &= \{x_2,x_3,\ldots,x_{N-m+1},\} \\ &\vdots \\ x_m^m &= \{x_m,x_3,\ldots,x_N,\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Суть рекурентного аналізу полягає у побудові спеціальних проекцій на двовимірну площину та чисельному оцінюванні отриманих геометричних структур. Проекція (3) на площину являє собою матрицю розміром $(n-m)\cdot(n-m)$, елементи якої характеризують відстань між траєкторією в моменти часу *i* та j. У найпростішому випадку матриця є бінарною і описується співвідношенням

$$R_{i,j}=\sigma(\varepsilon-x_i-x_j), i,j=1,2,\ldots N-m, \quad (4)$$

де ε – розмір околу навколо точки x_i в момент часу i, $\sigma(\bullet)$ – функція Хевісайда, $\bullet$ – Евклідова норма. Для аналізу рекурентних діаграм використовують декілька оцінок [14,15], серед яких в роботі досліджено рекурентність, детермінізм і ентропію.

Рекурентність показує частку рекурентних точок, що потрапляють в інтервал ε радіусом

$$Rec=\frac{1}{N^2}\sum_{i,j}^{N-m}R_{i,j}. \quad (5)$$

Детермінізм показує частку точок, що утворюють діагональні структури, довжиною не менше l_{min} в

загальній кількості рекурентних точок

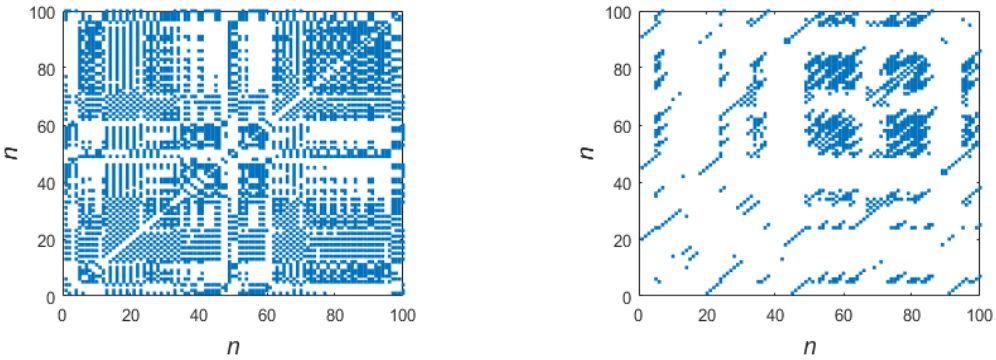
$$Det = \frac{\sum_{l_{min}}^{l_{max}} l * P(l)}{\sum_{i,j}^{N-m} R_{i,j}}, \tag{6}$$

де $P(l)$ – ймовірність утворення діагоналі довжиною l.

Ентропія є оцінкою повторюваності частин траєкторії досліджуваного процесу.

$$Entr = -\sum_{l_{min}}^{l_{max}} P(l) ln(P(l)). \tag{4.6}$$

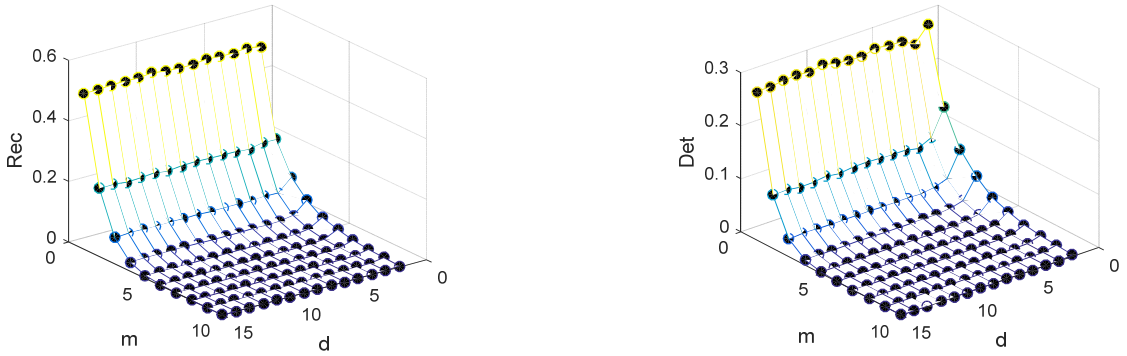
Задача оцінки можливостей рекурентного аналізу щодо визначення розмірності хаотичної системи актуальна в контексті прихованості обміну даних в інформаційних та криптографічних застосуваннях, перевірки взаємозв'язку між розмірністю системи і псевдофазового простору та значеннями характеристик рекурентності. Для досліджень використаємо систему (2). Приклади рекурентних діаграм приведено на рис. 5.



а б

Рис. 5. Рекурентні діаграми системи (2) при $\varepsilon = 0,4$, $d = 2$ та розмірності псевдофазового простору $m = 1$ – (*а*); $m = 5$ – (*б*)

Результати розрахунків характеристик рекурентних діаграм отримані для вибірки $N = 10000$ приведено на рис. 6. Рекурентність при постійній розмірності псевдофазового простору не залежить від розмірності хаотичної системи. При зростанні m рекурентність зменшується, що зумовлено зменшенням кількості точок які попадають в межі околу ε (рис. 6 *а*). Детермінізм зменшується при зростанні розмірності псевдофазового простору, незалежно від розмірності системи (рис. 6 *б*).



а б

Рис. 6. Залежності рекурентності, детермінізму та ентропії від розмірності системи та псевдофазового простору при $\varepsilon = 0,4$, $l_{min} = 3$

На рис. 7 приведено залежність ентропії розподілу діагоналей від розмірності хаотичної системи та псевдофазового простору. Поріг рекурентності ε вибирався так, щоб забезпечити постійне значення рекурентності. Аналіз залежностей свідчить, що ентропія спочатку з ростом d зменшується, а потім її значення стабілізується. Така закономірність має місце при $d \geq m + 2$ і $m \in [1,5]$.

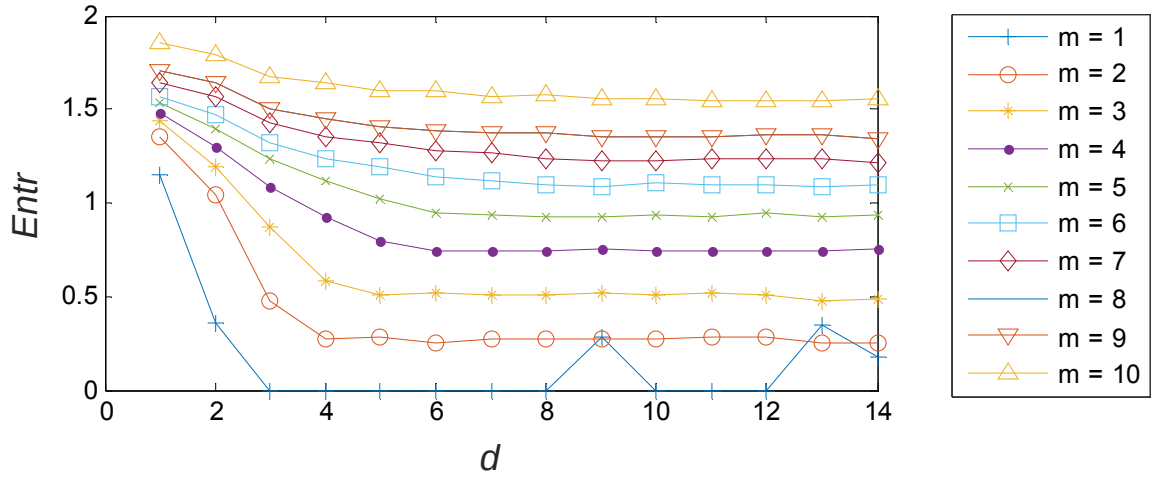


Рис. 7. Залежність ентропії від розмірності системи та псевдофазового простору $l_{min} = 3$ **та** $Rec = const$

При $m \geq 6$ перехід залежності $Entr(d,m)$ від спаду до постійного значення є плавним, а достовірне визначення розмірності системи вимагає значного збільшення об'єму вибірки до $N > 100000$, що ускладнює застосування характеристик рекурентності до експериментальних даних.

Висновки

В роботі за допомогою біфуркаційних діаграм та спектру показників Ляпунова виявлено наявність хаотичних та гіперхаотичних режимів, неперервних за зміною параметра в двовимірній системі Тратаса. Показано можливість отримання хаотичних дискретних часових рядів з рівномірним розподілом. Проведено оцінку можливостей встановлення розмірності хаотичної системи засобами рекурентного аналізу. З результатів дослідження слідує висновок, що на основі залежності ентропії розподілу діагоналей рекурентної діаграми можливо оцінити нижню межу розмірності фазового простору системи d, яка пов'язана з розмірністю псевдовазового простору простору m, як $d \geq m+2$ при $m \in [1,5]$.

Література

1. Garasym O. Exploring some topologies of coupled chaotic networks / Oleg Garasym, Ren´e Lozi, Ina Taralova // International Workshop on Nonlinear Maps and their Applications, Jun 2015, Dublin, Ireland. pp.34–39, 2016, Proceedings of NOMA'15, University College Dublin.

2. Krulikovskyi O.V. Testing timeseries ring-coupled map generated by on FPGA / O.V. Krulikovskyi, S.D. Haliuk, L.F. Politanskyi // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2016. – № 2. – С. 69–77.

3. Пивовар О. С. Моделювання випромінювання плат із вбудованими компонентами для передачі широкосмугових хаотичних сигналів / О. С. Пивовар, О. Б. Голевич // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 1. – С. 213–216.

4. Пивовар О.С. Дослідження впливу значення абсолютної похибки вирішення систем диференційних рівнянь на атрактори типу «ФОКУС» для генератора Чуа / О.С. Пивовар, О.Б. Голевич // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 6. – С. 243–246.

5. Keuninckx Lars Encryption key distribution via chaos synchronization / Keuninckx Lars, Soriano Miguel C., Fischer Ingo, Mirasso Claudio R., Nguimdo Romain M., Van der Sande Guy // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, Sp - 43428.

6. Птицын Н. Приложение теории детерминированного хаоса в криптографии / Н. Птицын. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 80 с.

7. Шахтарин Б.И. Генераторы хаотических колебаний / Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьэв, С.В. Митин. – Москва : Галилеос АРВ, 2007. – 247 с.

8. Harris Bernard Probability Distributions Related to Random Mappings / Bernard Harris // Ann. Math. Statist. – 1960. – Volume 31, Number 4. P. 1045–1062.

9. Yuan G. Collapsing of chaos in one dimensional maps / G. Yuan, J. A. Yorke // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2000. – № 136. – P. 18–30.

10. Тратас Ю.Г. Применение методов статистической теории связи к задачам приема хаотических колебаний / Ю.Г. Тратас // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 11. – С. 57–80.

11. Кириченко Л.О. Анализ и распознавание реализаций сигналов, обладающих фрактальными свойствами / Л.О. Кириченко, Ю.А. Кобицкая, Н.А. Дёмина // БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА. – 2015. – № 1 (84). – С. 49–55.

12. Кириченко Л. Комплексный подход к исследованию фрактальных временных рядов / Л. Кириченко, Л. Чалая // International Journal "Information Technologies & Knowledge". – Volume 8, Number 1. –

2014. – P. 22–28.

13. Eckman J. P. Recurrence Plots of Dynamical Systems / J. P. Eckman, S. O. Kamphorst, D. Ruelle // Europhys. Lett. – 1987. – № 4 (9). – P. 973–977.

14. Joseph S. Iwanski Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed? / Joseph S. Iwanski and Elizabeth Bradley // Chaos. – 1998. – V. № 8. – P. 861–871.

15. Norbert Marwan Recurrence plots for the analysis of complex systems / Norbert Marwan, M. Carmen Romano, Marco Thiel, Jürgen Kurths // Physics Reports – 2007. – V. 438 (5–6). – P. 237–329.

References

1. Garasym O. Exploring some topologies of coupled chaotic networks / Oleg Garasym, Ren´e Lozi, Ina Taralova // International Workshop on Nonlinear Maps and their Applications, Jun 2015, Dublin, Ireland. pp.34–39, 2016, Proceedings of NOMA'15, University College Dublin.

2. Krulikovskyi O.V. Testing timeseries ring-coupled map generated by on FPGA / O.V. Krulikovskyi, S.D. Haliuk, L.F. Politanskyi // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. – 2016. – # 2. – S. 69–77.

3. Pyvovar O. S. Modeliuvannia vyprominiuvannia plat iz vbudovanymy komponentamy dlia peredachi shyrokosmuhovykh khaotychnykh syhnaliv / O. S. Pyvovar, O. B. Holevych // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2014. – # 1. – S. 213–216.

4. Pyvovar O.S. Doslidzhennia vplyvu znachennia absoliutnoi pokhybky vyrishennia system dyferentsiinykh rivnian na atraktory typu «FOKUS» dlia heneratora Chua / O.S. Pyvovar, O.B. Holevych // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2014. – # 6. – S. 243–246.

5. Keuninckx Lars Encryption key distribution via chaos synchronization / Keuninckx Lars, Soriano Miguel C., Fischer Ingo, Mirasso Claudio R., Nguimdo Romain M., Van der Sande Guy // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, Sp - 43428.

6. Ptytsyn N. Prylozhenye teoryy determynyrovannoho khaosa v kryptohrafyy / N. Ptytsyn. – Moskva : MHTU ym. N. E. Baumana, 2002. – 80 s.

7. Shakhtaryn B.Y. Heneratory khaotycheskykh kolebanyi / B.Y. Shakhtaryn, P.Y. Kobylkyna, Yu.A. Sydorkyna, A.V. Kondratev, S.V. Mytyn. – Moskva : Halyleos ARV, 2007. – 247 s.

8. Harris Bernard Probability Distributions Related to Random Mappings / Bernard Harris // Ann. Math. Statist. – 1960. – Volume 31, Number 4. P. 1045–1062.

9. Yuan G. Collapsing of chaos in one dimensional maps / G. Yuan, J. A. Yorke // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2000. – № 136. – P. 18–30.

10. Tpatac Yu.H. Ppymenenye metodov statystycheskoi teoryy sviazy k zadacham pryema khaotycheskykh kolebanyi / Yu.H. Tpatac // 3apybezhnaia radyoэlektronyka. Uspekhy sovremennoi padyoэlektronyky. – 1998. – # 11. – S. 57–80.

11. Kyrychenko L.O. Analyz y raspoznavanye realyzatsyi syhnalov, obladaiushchykh fraktalnыmy svoistvamy / L.O. Kyrychenko, Yu.A. Kobytskaia, N.A. Dëmyna // BYONYKA YNTELLEKTA. – 2015. – # 1 (84). – S. 49–55.

12. Kyrychenko L. Kompleksnыi podkhod k yssledovanyiu fraktalnыkh vremennыkh riadov / L. Kyrychenko, L. Chalaia // International Journal "Information Technologies & Knowledge". – Volume 8, Number 1. – 2014. – P. 22–28.

13. Eckman J. P. Recurrence Plots of Dynamical Systems / J. P. Eckman, S. O. Kamphorst, D. Ruelle // Europhys. Lett. – 1987. – № 4 (9). – P. 973–977.

14. Joseph S. Iwanski Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed? / Joseph S. Iwanski and Elizabeth Bradley // Chaos. – 1998. – V. № 8. – P. 861–871.

15. Norbert Marwan Recurrence plots for the analysis of complex systems / Norbert Marwan, M. Carmen Romano, Marco Thiel, Jürgen Kurths // Physics Reports – 2007. – V. 438 (5–6). – P. 237–329.

Рецензія/Peer review : 02.07.2017 р. Надрукована/Printed :01.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сарибекова Д.Г.

УДК 621.384

Н.В. ТІТОВА, М.В. БАЧИНСЬКИЙ, Л.Г. КОВАЛЬ, О.С. КОЗОРІЗ
Вінницький національний технічний університет

ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ І БАЗОВИХ РЕЖИМІВ ОПРОМІНЕННЯ ДЛЯ РИБОРОЗВОДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В роботі було проведено дослідження випромінювання для опромінення ікри, личинок та молодняка риб. Обрано його оптимальні параметри, а саме потужність; яскравість; дозу опромінення; час експозиції; рівномірність опромінення поверхні; площу опромінення. Досліджено вплив переходів від освітлення до темряви і навпаки; зміну яскравості і кольорової мозаїки; переходи тільки до одного із кольорів.

Ключові слова: світлодіоди, інкубаційний процес, процес вирощування риб, випромінювання.

N.V. TITOVA, M.V. BACHINSKIY, L.G. KOVAL, O.S. KOZORIZ
Vinnytsia National Technical University

JUSTIFICATION LED EMITTERS AND BASIC MODE FISH FARMING OF RADIATION TECHNOLOGIES

The study was conducted radiation exposure for eggs, larvae and young fish. Optimum output settings: power; brightness; dose; exposure; uniform irradiation surface; area exposure. The effect of transitions from light to dark and vice versa; change brightness and color mosaics; transitions only one of colours. Microcontroller will add various control functions through the use of embedded USART. A possibility of using virtually any communications device with RS-232 interface individually control the intensity of red, green and blue crystals by changing the filling factor of PWM signals.

Keywords: LED, the incubation process, the process of growing fish radiation.

Вступ

Результати досліджень багатьох авторів (Анімов Н. А., 1994; Ручин А. Б., 2008; Петрушин А. Б., 2011 та інших) свідчать про те, що освітленість є потужним стимулятором розвитку багатьох видів риб (короп, щука, осетер, білий амур тощо). Більше того, в цих же дослідженнях доведено, що практично для кожного виду риб існує свій, індивідуальний або оптимальний діапазон освітлення, при якому функціональний статус біоорганізму має позитивну динаміку. Відомо, що світло впливає на центральну нервову систему (ЦНС) біоорганізму через зоровий аналізатор – око, а вже після цього ЦНС здійснює свій вплив на функцію гіпофізу, який в свою чергу, впливає на функцію статевих залоз [1]. Наведений механізм і є підтвердженням того, що статева періодичність риб регулюється, з одного боку, зовнішнім фактором – світлом, а з другого, внутрішнім – дією гіпофізу, який виконує функцію «Трансформатора» світла [1]. Зрозуміло, що ефективність зазначеного процедури буде залежати від джерела світла, його власних параметрів, умов і режиму опромінення, стану водного середовища, глибини опромінення тощо. Найбільш ефективним є змінний режим опромінення, при якому чергуються періоди освітленості і темноти на протязі доби. Одним із найбільш часто використовуваних режимів опромінення є такий, при якому на протязі доби світло вмикається одномоментно в 6^{00}, 8^{00} або 10^{00} і вимикається в 22^{00}, 20^{00} або 18^{00} (таким чином здійснювалася імітація 16, 12 або 8 годинного світлового дня). Джерелом світла слугувала люмінесцентна лампа марки ЛБ на відстані 50 см від поверхні води. Нами було запропоновано змінити режими освітлення, точніше, не самі режими, а характер переходу від світла до темноти і навпаки, з дискретного, однемоментного на послідовний, з плавним переходом від одного режиму до іншого. Причиною такої зміни стала гіпотеза, яка була висловлена одним із наших дослідників, що дискретний, різкий перехід від світла до темноти і навпаки, викликає у риб стрес, який веде до різких негативних наслідків в розвитку личинок риб. Було поставлено експеримент із використанням апарата Вейса на личинках коропа, білого амура і товстолоба, який повністю підтвердив висловлену гіпотезу. Якщо, за даними [1] при освітленості в 1000 лк і дискретному режимі опромінення середня маса личинок товстолоба становила 14,93 ± 0,94 мг, а довжина – 11,59 ± 0,24 мм при виживаємості 90,8%, то за нашими, експериментальними даними, середня маса молоді товстолобика дорівнює 16,12 ± 1 мг, довжина – 11,95 ± 0,31 мм, а виживаємість зросла до 94,35% [2].

Опосередковано це підтверджено і авторами роботи [3], які показали, що найбільший приріст молоді осетра було отримано при змінах добової освітленості від 200лк до 1000лк. Доведено також, що режим освітленості впливає на інтенсивність вживання корму, коли при цілодобовій освітленості молодь коропа споживала його найбільш активно з 4^{00} до 7^{00} годин ранку і з 17^{00} до 19^{00} ввечері (близько 65% добової норми). Також є відомості, що при вирощуванні коропа в басейнах з замкнутим циклом водопостачання встановлено такий оптимальний режим освітлення: передування на протязі доби 20-годинного періоду освітлення водної поверхні з 4-годинною перервою в нічний час [1].

Результати

При вирощуванні молоді в акваріумах з використанням люмінесцентних ламп марки ЛБ, які були розміщені на відстані 50 см від поверхні води, і режимі освітлення (світло включалося одномоментно в 6^{00}, 8^{00} або 10^{00} годин ранку і відключалося в 22^{00}, 20^{00} або 18^{00}, що імітувало 16, 12 або 8 годинний світловий день) авторами були отримані такі результати [4]:

Таблиця 1

Результати підрощування білого товстолобика при різній освітленості

Цілодобова освітленість, лк	Середня маса молоді, мг	Довжина молоді, мм	Виживаємість, %
100	13,48 ± 1,12	11,54 ± 0,55	91,0
300	13,60 ± 0,78	11,60 ± 0,36	89,5
600	12,79 ± 0,62	11,34 ± 0,22	87,3
1000	14,93 ± 0,94	11,59 ± 0,24	90,8
темрява	9,48 ± 1,31	10,69 ± 0,3	32,5
Періодично 100 лк по 12 годин на добу	10,07 ± 1,27	10,96 ± 0,27	37,8

Нами були проведені аналогічні дослідження для молоді коропа, карася срібного і білого амура, результати яких для режиму цілодобової освітленості при тих же параметрах, що і для товстолоба, показали високий ступінь кореляції (розходження від 3,8% до 6,4%). В той же час, для режиму темряви такий параметр, як швидкість росту (середня маса і довжина) було отримано такі дані.

Швидкість росту зменшилася: для коропа – в 1,89 рази; для карася срібного – в 2,03 разу; для білого амура – в 1,63 разу. Режим 12 годин освітленості в 100 мс на добу – не досліджувався.

Враховуючи, що ми маємо справу не з люмінесцентними лампами, а надяскравими RGB світлодіодами, має сенс оцінити вплив спектральних складових, їх випромінювання на личинки товстолоба і коропа.

При цьому на RGB світлодіоди було подано стандартну напругу: червоний – 1,6÷2,1 В; зелений – 3,1 В; блакитний (синій) – 3,1÷3,45 В; жовтий – 2,0 В. Подібне дослідження, з тим же самим матеріалом (личинки товстолоба і коропа), ми провели замінивши дискретні RGB-світлодіоди на світлодіодну стрічку з параметрами: кількість світлодіодів на метр – 60; яскравість – 800 лм; потужність – 12 Вт; напруга живлення – 12 В. Блок управління було розроблено на базі мікроконтролера Atmega 8. Стрічка герметична в силіконовій оболонці.

Отримані результати (таблиця 2) ясно свідчать про правильність підходу до вибору випромінювачів, оскільки тільки використовуючи світлодіодну стрічку, можна досягти рівномірності освітлення водної поверхні в межах 96%, що позитивно впливає на показники росту личинок.

Таблиця 2

Залежність параметрів молоді товстолобика від типу освітлення

Спектральні складові світла		Середня маса молодняка, мг	Довжина личинок, мм	Виживаємість, %
білий	RGB-світлодіод	14,32±1,3	14,96±1,2	94,7
	RGBW- стрічка	14,96±1,2	12,92±0,45	98,6
червоний	RGB-світлодіод	13,21±2,9	12,04±0,56	60,3
	RGBW- стрічка	13,9±1,8	12,48±0,41	64,1
жовтий	RGB-світлодіод	13,41±1,52	12,23±0,38	61,9
	RGBW- стрічка	14,02±1,41	12,89±0,36	65,3
зелений	RGB-світлодіод	15,62±1,56	12,42±0,46	89,4
	RGBW- стрічка	15,99±1,72	12,88±0,31	92,1
синій	RGB-світлодіод	14,88±1,74	12,75±0,45	88,9
	RGBW- стрічка	15,36±1,82	13,11±0,48	91,6

Для підвищення ефективності всього інкубаційного процесу, і процесу опромінення, в. т. ч., необхідно забезпечити необхідний температурний режим і режим насичення води киснем. Практично завжди, ікру доставляють в інкубаційний цех в спеціальних контейнерах.

При розробці світлодіодних терапевтичних апаратів основною проблемою є вибір виду світлодіода для отримання найбільшого терапевтичного ефекту. Можна виділити кілька видів випромінюючих світлодіодів: блимаючі світлодіоди, що містять інтегрований кругообіг мультивібратора всередині, який змушує світлодіод спалахувати з типовим періодом в одну секунду; кольорові миготливі світлодіоди, що складаються з двох працюючих назустріч світлодіодів (електричний струм в одному напрямку виробляє один колір, струм в протилежному напрямку виробляє інший колір); триколірні світлодіоди (два світлодіода в одному, що мають загальний анод або катод). У свою чергу серед триколірних виділяють RGB-світлодіоди, які містять червоний, зелений і синій емітенти. При відповідному управлінні RGB-світлодіодом біологічний об'єкт можна опромінювати як червоним, зеленим, синім променями, що володіють найбільш вираженими біотропними властивостями, так і, при необхідності, променями кількох кольорів, використовуючи їх змішування [9].

При змішуванні одночасно RGB кольорів, ми отримуємо білий колір: змішуючи синій (B) і червоний (R) – отримуємо пурпурний (M magenta), а зелений (G) і червоний (R) – жовтий (Y yellow). Змішування зеленого (G) і синього (B) дає циановий відтінок (C cyan). При цьому можна отримати любу

кольорову гамму, кольоровий відтінок якої буде залежати: а) від комбінації ввімкнених світлодіодів; б) режимів керування, що визначають середню яскравість кожного із світлодіодів; в) конфігурації розміщення [9].

Режим роботи світлодіодів визначається прямокутними послідовностями, які формуються генераторами і впливають на величину середнього струму світлодіода, його середню яскравість і частоту світіння, яке в сучасних моделях складає не менше 100 Гц. Керування режимом може здійснюватися в ручному і автоматичному режимах, однак і так, і так буде використана широко-імпульсна модуляція (ШІМ) і мікроконтролери типу ATtimy2313, Atmega8, SONIX. На рис. 1 показана залежність яскравості світіння любого із RGB кольорів у визначений момент часу [8].

Ще один варіант підключення мікроконтролера в ручному режимі і діаграми його роботи показані на рис. 2 (а, б) [9]. При такому ввімкенні колір RGB-світлодіода регулюється одним потенціометром, забезпечуючи режим «круговий цикл зміни кольору», а подаючи на вхід «керування» ШІМ сигнал регулюється яскравість всіх трьох каналів RGB-світлодіода [9].

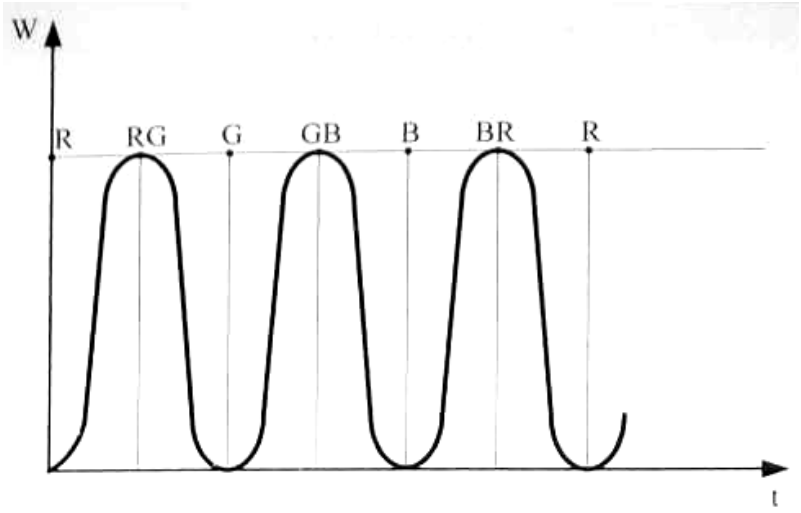


Рис. 1. Зміни яскравості світіння в RGB-світлодіодах [8]

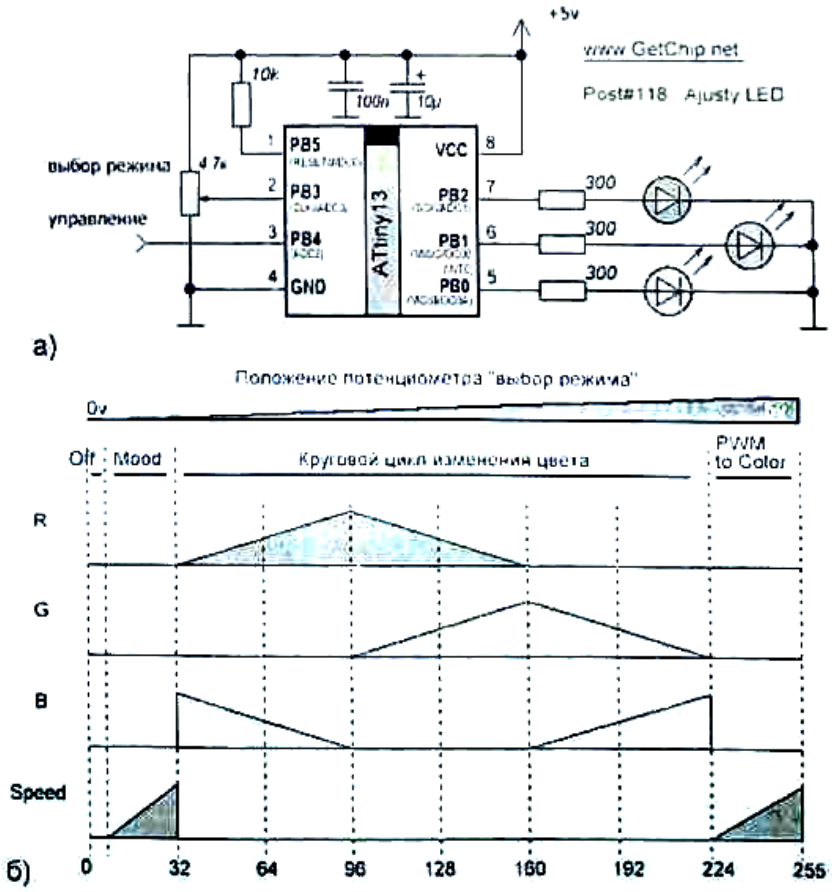


Рис. 2. Ручне керування RGB-світлодіодом [9]

Проте кращим, у зв'язку з низкою причин, виявився автоматичний режим, який, як уже відзначалося, буде формувати, ШІМ сигнали на виводах кожного драйвера (рис. 3) [6].

Підключення мікроконтролера дозволить додати різні функції управління за рахунок використання вбудованого USART. З'явиться можливість за допомогою практично будь-якого пристрою з комунікаційним інтерфейсом RS-232 індивідуально управляти інтенсивністю червоного, зеленого і синього кристалів шляхом зміни коефіцієнтів заповнення сигналів ШІМ [6].

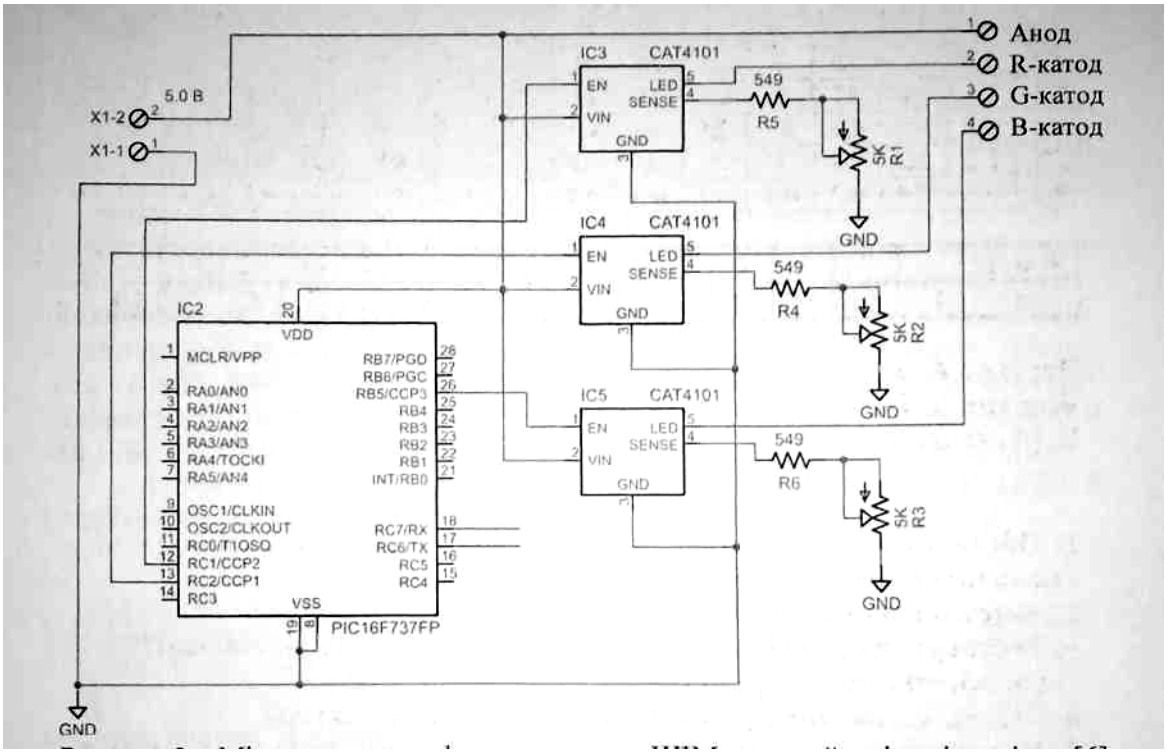
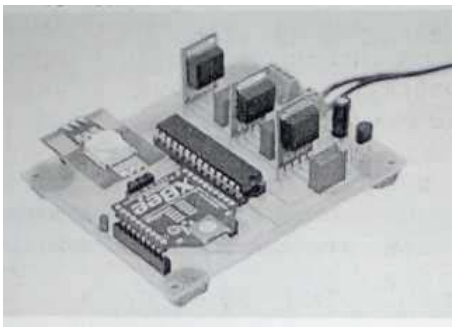


Рис. 3. Мікроконтролер формує сигнали ШІМ для драйверів світлодіода [6]

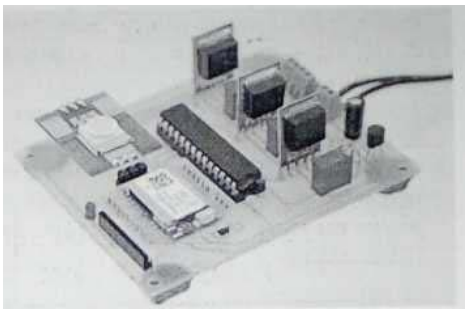
Для ефективного управління по інтерфейсу RS-232 необхідно, перш за все, встановити такий струм для кожного RGB кристала, щоб отримати результуючий білий колір світіння. З цією метою входи Enable драйверів слід підключити до високого рівня, ніж буде поставлено коефіцієнт заповнення 100%, і вручну підлаштувати струми через кристали за допомогою потенціометрів [6].

Струми кристалів повинні бути встановлені на максимальні необхідні додатком рівні (до 1 А), при яких ще можливо отримати в достатній мірі чистий білий колір світіння. Після того, як струми виставлені, управління коефіцієнтами заповнення на виходах ШІМ мікроконтролера буде викликати відносну зміну світлового потоку кожного кристала, результатом чого стане формування необхідного кольору [6].

Команди управління коефіцієнтом заповнення ШІМ приймаються модулем UART мікроконтролера від пристрою з інтерфейсом RS-232. Такими пристроями можуть бути послідовний порт персонального комп'ютера, конвертер USB-RS-232 (віртуальний COM-порт) або бездротовий модуль, який використовує протоколи ZigBee або Bluetooth, (рисунок 4, а, б) [6].



а)



б)

а) керування встановленим на платі RGB світлодіодом за допомогою ZigBee модуля;
б) керування встановленим на платі RGB світлодіодом за допомогою Bluetooth модуля.
Рис. 4. Бездротові модулі з протоколом ZigBee (а) і Bluetooth (б) [6]

Зміна кольору забезпечується мікроконтролером, який кожному із RGB кольорів може встановити 256 рівнів яскравості, що дозволяє отримати 16777216 відтінків, тобто створити практично будь-який кольоровий фон для ікри.

Останнім часом активний розвиток отримали світлодіодна RGB і RGBW стрічки на основі надяскравих світлодіодів (рис. 5) [6].

Рис. 5. Чотириколірна RGBW стрічка [5]

Стандартна кількість світлодіодів – це 30 led або 60 led на 1 м, рідко зустрічаються на 72 led/м. У табл. 3 показано сумарна яскравість і потужність всіх кольорів одночасно на SMD 5050 на 1 м. Стрічки на 12 V.

Таблиця 3

Параметри різних типів світлодіодних стрічок

Світлодіодів на метр	Яскравість, Лм.	Потужність, Вт
15	200	3
30	400	6
60	800	12
72	940	14,4
120	1600	24

Продається світлодіодна RGB стрічка в рулонах на катушках (рис. 6). У продажу зустрічаються екземпляри по 60 і по 30 світлодіодів на метр, тобто світлодіоди щільніше або рідше розташовані на стрічці. Беремо 60 світлодіодів на метр. Стрічка герметична, тобто знаходиться в силіконовій оболонці. З силіконом конструктивно набагато надійніше [7].

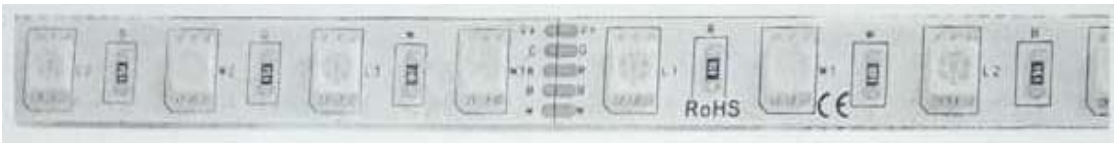


Рис. 6. Відрізок світлодіодної стрічки в силіконовій оболонці [7]

Стрічка має маркери місць розрізу і контактних площадок (+12 V, G, R, B). Може розрізатися на шматочки по три світлодіода. Квадратні світло діоди під силіконом мають по 6 виводів, три – з однієї і три – з протилежної сторони. Візуально під загальною лінзою знаходяться три кристали.

Дана стрічка комплектується блоком керування і пультом дистанційного керування. Блок керування зібраний на мікроконтролері SONIX типу SN8P2501B і мікросхемі пам’яті 24C02C [7].

Рис. 7. Зовнішній вигляд блока керування [5]

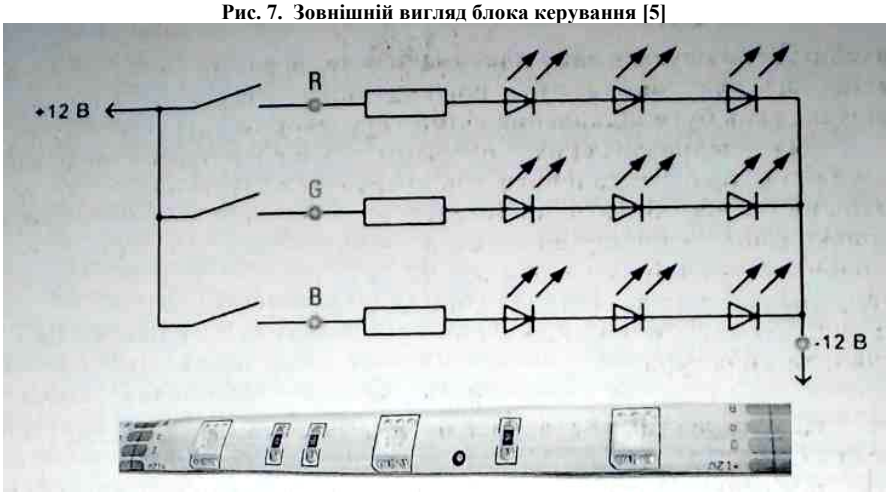


Рис. 8. Електрична схема одного сегмента із 3 штук [5]

Триколірний RGB світлодіод SMD 5050 складається з 3 діодів SMD 3528, розміщених в одному корпусі. Використовується 3 різних кольори R – червоний, G – зелений, B – синій. За допомогою змішування цих 3 кольорів отримуємо будь-які кольори і відтінки.

Візуальною відмінністю звичайної стрічки від RGB буде наявність 3 резисторів на одній відрізній секції та відповідне маркування. У звичайній ставиться тільки один резистор [5].

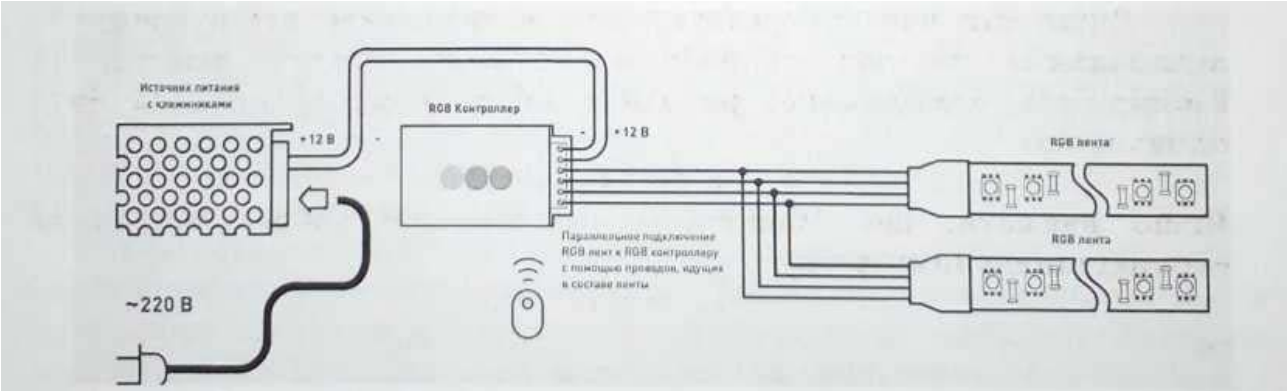


Рис. 9. Паралельне підключення ВСВ контролера [5]

На блоці керування нанесене маркування, а дроти мають відповідний колір.

Виберемо контролер для RGB стрічки, блок живлення тощо.

1. **Модель RGB-44** – контролер для RGB стрічки.

Інфрачервоний пульт з 44 кнопками і 3 каналами.

Живлення: 12В, максимальний струм на канал – 2А.

Основні функції: вкл./викл.; установка кольору (20 фіксованих кольорів + 6 таких, що налагоджує користувач).

Регулювання яскравості; режим пауза; 8 динамічних ефектів.

Вартість 150 грн.

2. **Модель RGB-19RF** – контролер для моделі RGB стрічки з керуванням по радіоканалу.

Контролер з радіо пультом; 19 програм; 3 канали.

Живлення: 12 ... 24В, максимальний струм на канал – 4А.

Основні функції: вкл./викл.; установка кольору (20 фіксованих кольорів).

Регулювання яскравості; швидкості.

19 динамічних ефектів; режим паузи.

Вартість 120 грн.

Блоки живлення MEANWELL (Taiwan), IP67, герметичні, гарантія 2 роки, напруга 12В.

LPV-35-12: потужність 35 ВТ; максимальний струм – 3,0 А; розмір, мм – 150*40*30, вартість 300 грн.

LPV-35-12: потужність 60 ВТ; максимальний струм – 5,0 А; розмір, мм – 165*42*32, вартість 350 грн.

Блоки живлення мають захист від КЗ, перенавантаження, працюють при 100% навантаженні.

Для зручності роботи сформуємо таблицю, що відображає значення питомої потужності та яскравості LED стрічки з різними світлодіодами (табл. 3).

Таблиця 3

Характеристики освітлювальних елементів

Кількість діодів на 1 метр	Діод 2835		Діод 3528		Діод 5050		Подвійна 3528х2		Подвійна 5050х2	
	потужність Вт/м	яскравість Лм/м	потужність Вт/м	яскравість Лм/м	потужність Вт/м	яскравість Лм/м	потужність Вт/м	яскравість Лм/м	потужність Вт/м	яскравість Лм/м
15			1,2	60	3	200				
30	6	600	2,4	120	6	400	2,4	120	6	400
60	12	1200	4,8	240	12	800	4,8	240	12	800
72	14,4	1440	5,8	290	14,4	940				
120			9,6	480	24	1600	9,6	480	24	1600
24			19,2	960						

Використовуючи таблицю виберемо в якості основного випромінювача для апаратів Вейса світлодіодну, вологозахищену, повнокольорову стрічку на світлодіодах SMD 5050 у кількості 60 шт. на 1 м, потужністю 7,2 Вт/м і напругою живлення 12 В. Тип стрічки – ORSS-50-6RGB. В процесі проектування апаратного забезпечення інформаційної технології передбачається також використання і окремих RGB надяскравих світлодіодів з такими технічними характеристиками:

1. 3R5 – надяскравий світлодіод, 5 мм, забезпечує кольори: W (білий), WW (теплий білий), R (червоний), G (зелений), B (синій), Y (жовтий). Напруга живлення – 2,1 ± 3,4В; струм – 20мА; сила світла, mcd – 1600 ÷ 18000; кут розсіювання, град – 15, 30, 45.

2. 3R5F – Піранья (superflux) надяскравий світлодіод, кольори: W (білий), WW (теплий білий), R (червоний), G (зелений), B (синій), Y (жовтий). Напруга живлення – 2,1 ± 3,4В; струм – 20 мА; сила світла, mcd – 5000 ÷ 12000; кут розсіювання, град – 60.

3. RRB – 3 Вт, потужний на 3-х кристалах світлодіод Red 650 нм + Red 650 нм + Blue 445 нм; U/I=2,0÷3,3 В/350 мА.

4. RRB – 3 Вт, потужний на 3-х кристалах світлодіод Red 650 нм + Blue 445 нм Blue 445 нм, U/I=2,0÷3,3В/350 мА

Зазначені світлодіоди випромінюють довжини хвиль від 760 нм до 400 нм, які відповідають таким кольорам:

Червоний – 700-630 нм;

Помаранчевий – 630-600 нм;

Жовтий – 600-570 нм;

Зелений – 550-520 нм;

Блакитний – 510-480 нм;

Синій – 470-440 нм;

Фіолетовий – 430-400 нм.

Опромінення оборотної води червоним світлом здійснювались в діапазоні 650-680 нм при потужності опромінення 0,05-0,15 Вт/см у вечірні години щодоби на всьому протязі процесів інкубації запліднeної ікри і вирощування молоді риб.

Опромінення запліднeної ікри і вільних ембріонів синім світлом здійснювали в діапазоні 430-460 нм при потужності опромінення 0,10-0,20 Вт/см протягом 15–20 хвилин в ранкові години, щодоби до стадії личинок.

Потужність випромінювання; клас безпеки приладу – II клас; доза опромінення, час експлуатації, рівномірність опромінення.

Висновок

Таким чином, випромінювання, яке планується застосувати для опромінення ікри, личинок та молодняка риб, повинно бути а) немонохроматичним; б) некогерентним; в) дифузним або змішаним; г) характеризуватися такими параметрами: потужність випромінювання; яскравість; доза опромінення; час експозиції; рівномірність опромінення поверхні; площа опромінення.

Переходи від освітлення до темряви і навпаки; зміна яскравості і кольорової мозаїки; переходи тільки до одного із кольорів будуть здійснюватися плавно, без різких змін освітленості.

Література

1. Власов В.А. Влияние света на рост и развитие рыб / В.А. Власов, Н.И. Маслова, С.В. Пономарев, Ю.М. Бокенева / Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 24–34.

2. Титова Н. В. Вплив режимів освітлення на розвиток личинок риб / Н. В. Титова, С. В. Павлов, С. М. Злепко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса-Хмельницький : ХНУ, 2016. – С. 145.

3. Ручин А. Б. Особенности роста и энергетики карпа (Cyprinus carpia) при различной освещенности / А. Б. Ручин / Зоологический журнал. – 2001. – Т. 80, № 2. – С. 433–437.

4. Ручин А. Б. Влияние характеристик света на развитие, рост и физиолого-биохимические показатели рыб и амфибий : автореф. дис. ... д-ра биол. наук / А. Б. Ручин. – Саранск, 2008. – 52 с.

5. Казанцев С. Лучшая светодиодная лента RGB на 12V и 220V [Электронный ресурс] / Сергей Казанцев // Светодиодные лампы и ленты. – Режим доступа : http://led-obzor.ru/luchshava-svetodiodnava-lenta-rgb-12v-i-220v.

6. Rhen S. Управление цветовой гаммой мощных RGB светодиодов CAT4101 / Shawn Rhen // Радиолоцман. – 2014. – № 03 (март). – С. 40–43.

7. Носов Т. Многоцветная светодиодная подсветка или RGB-контроллер своими руками [Электронный ресурс] / Тимофей Носов // LabKit. – Режим доступа : http://labkit.ru/html/autocontrol?id=420.

8. Трехцветный RGB светодиод и IIIHM(PWM) на микроконтроллере ATtiny2313 [Электронный ресурс] // AVR Lab: устройства на микроконтроллерах AVR. – Режим доступа : https://avrlab.com/node/63.

9. 118-Adjusty_LED – подстраиваемый RGB-светодиод [Электронный ресурс] // GetChip. – 07.07.2015. – Режим доступа : http://www.getchip.net/posts/! 18-adiusty led-podstraivaemvii-rgb-svetodiod.

References

1. Vlasov V.A. Vlyianye sveta na rost y razvytye ryb / V.A. Vlasov, N.Y. Maslova, S.V. Ponomarev, Yu.M. Bokeneva / Vestnyk AHTU. Seryia: Rybnoe khoziaistvo. – 2013. – # 2. – S. 24–34.

2. Tytova N. V. Vplyv rezhymiv osvitlennia na rozvytok lychynok ryb / N. V. Tytova, S. V. Pavlov, S. M. Zlepko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh : materialy XVI mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. – Odesa-Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – S. 145.

3. Ruchyn A. B. Osobennosty rosta y эnerhetyky karpa (Cyprinus carpia) pry razlychnoi osveshchennosty / A. B. Ruchyn / Zoolohycheskyi zhurnal. – 2001. – T. 80, # 2. – S. 433–437.

4. Ruchyn A. B. Vlyianye kharakterystyk sveta na razvytye, rost y fyzyoloho-byokhymycheskye pokazately ryb y amfybyi : avtoref. dys. ... d-ra byol. nauk / A. B. Ruchyn. – Saransk, 2008. – 52 s.

5. Kazantsev S. Luchshaia svetodyodnaia lenta RGB na 12V y 220V [Elektronnyi resurs] / Serhei Kazantsev // Svetodyodnye lampy y lenty. – Rezhym dostupa : http://led-obzor.ru/luchshava-svetodiodnava-lenta-rgb-12v-i-220v.

6. Rhen S. Upravlenye tsvetovoi hammoi moshchnykh RGB svetodyodov SAT4101 / Shawn Rhen // Radyolotsman. – 2014. – # 03 (mart). – S. 40–43.

7. Nosov T. Mnohotsvetnaia svetodyodnaia podsvetka yly RGB-kontroller svoymy rukamy [Elektronnyi resurs] / Tymofei Nosov // LabKit. – Rezhym dostupa : http://labkit.ru/html/autocontrol?id=420.

8. Trekhtsvetnыi RGB svetodyod y IIIHM(PWM) na mykrokontrollere ATtiny2313 [Elektronnyi resurs] // AVR Lab: ustroistva na mykrokontrollerakh AVR. – Rezhym dostupa : https://avrlab.com/node/63.

9. 118-Adjusty_LED – podstrayvaemыi RGB-svetodyod [Elektronnyi resurs] // GetChip. – 07.07.2015. – Rezhym dostupa : http://www.getchip.net/posts/! 18-adiusty led-podstraivaemvii-rgb-svetodiod.

Рецензія/Peer review : 16.07.2017 р. Надрукована/Printed :03.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Семак Б.Д.

УДК 371.3

О.Д. АЗАРОВ, А.В. СНІГУР, К.О. ГРИЦИШИНА
Вінницький національний технічний університет

ОГЛЯД МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ СПРИЙНЯТТЯ ЛЮДИНОЮ ТЕКСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗОБРАЖЕННЯМИ НА ОСНОВІ ЗМІНЕННЯ ЇХ ЗОВНІШНЬОГО ВИГЛЯДУ

У статті проведений аналітичний огляд методів покращення сприйняття людиною текстових матеріалів із зображеннями, виходячи з їх різного зовнішнього вигляду. На основі проведеного аналізу здійснено узагальнення та класифікацію зазначених існуючих методів. При цьому визначено методи змінення вигляду як окремих символів у тексті, так і груп символів, особливості змінення зовнішнього вигляду матеріалів залежно від його змісту, а також врахування додаткових чинників. На основі здійсненої класифікації сформовано рекомендації щодо поетапного застосування методів покращення сприйняття.

Ключові слова: текст, графіка, системи дистанційного навчання, фрагменти тексту, текстові матеріали, графічні матеріали.

O. D. AZAROV, A. V. SNIGUR, K. O. GRICISHINA
Vinnytsia National Technical University

REVIEW METHODS TO IMPROVE HUMAN PERCEPTION OF TEXTUAL MATERIAL DEPICTING BASED ON CHANGING THEIR APPEARANCE

In the the review of the methods to improve perceptions of textual material depicting based on their different appearance. Based on the analysis performed synthesis and classification of existing methods. This defines methods to change the form of individual text characters or groups of characters, especially changing the appearance of text materials depending on its content as well as taking into account additional factors. Based Classification formed recommendations for a phased application of methods to improve perceptions.

Keywords: text, graphics, remote learning, text snippets, text, graphics, text materials.

Вступ

Сучасні методи покращення сприйняття матеріалів навчального, рекламного, розважального чи іншого характерів на основі змінення їх зовнішнього вигляду як правило базуються на різних особливостях форматування тексту, його поданні, зокрема шляхом поділу на певні частини, використанні інфографіки тощо. При цьому можуть змінюватись розміри і тип шрифту [1–5], міжрядкові інтервали, а також кольори тексту та фону [6–10], відбуватися поділ тексту на фрагменти [11–13, 17], здійснюватися розташування інформації за визначеною схемою, зокрема подібно до англійської літери «F» [14], застосуватися інтуїтивно зрозумілі зображення [14–16].

Не зважаючи на велику кількість перелічених вище способів покращення сприйняття, недостатньо дослідженим можна вважати питання їх узагальнення та класифікації за ознаками, пов'язаними з аспектами засвоєння окремих складових елементів матеріалу, наприклад символів, груп символів. Це не дає можливості узгодити результати застосування різних методів для ефективного використання їх у комплексі.

Постановка задачі досліджень

Метою дослідження є узагальнення та класифікація існуючих методів покращення сприйняття людиною текстових матеріалів із зображеннями виходячи з їх зовнішнього вигляду за ознаками, пов'язаними з аспектами засвоєння окремих складових елементів матеріалу та його змісту, що у свою чергу може впливати на зовнішній вигляд матеріалів.

Задачами досліджень є:

- узагальнення та класифікація методів змінення параметрів окремих символів, а також груп символів (слів, речень тощо) тексту, що покращують сприйняття матеріалів;
- визначення деяких особливостей сприйняття змісту матеріалів, що впливають на його зовнішній вигляд, а також додаткових чинників, у тому числі розташування зображень у тексті;
- формування рекомендацій щодо поетапного застосування методів покращення сприйняття матеріалів.

Основна частина

Одним із базових складових елементів текстових матеріалів із зображеннями є окремі символи тексту, тому спочатку виконаємо аналітичний огляд особливостей їх сприйняття залежно від зовнішнього вигляду, а саме від типів шрифтів. Аналіз аспектів мислення та сприйняття у теорії та практиці застосування шрифту показує, що в цій сфері виникли певні суспільні й міжособистісні стереотипи [1]. Тобто існують так звані «чоловічі» та «жіночі» версії шрифтів. За статистикою прямолінійні шрифти, що виглядають як «машинні», «технічні», є привабливими для чоловіків, а в жінок популярними є більше декоративні, пластичні, заокруглені шрифти, з яскраво вираженими виносними елементами. Компромісом тут є антиквенні шрифти (Times, Times New Roman, Palatino, Lazurski, Bodoni та інші).

Дослідження виконані у [2] показали, що існують достовірні розходження рангових значень показників спектрів потужностей електроенцефалограм людського мозку при читанні різних шрифтових гарнітур у правій півкулі і задніх областях кори головного мозку (рис. 1). На рисунку 1 по вісі абсцис

вказані ритми мозку людини, а по вісі ординат – умовні показники потужностей спектрів для шрифтів, що вказані справа. Також згідно досліджень у [2] шрифт Times New Roman є зручним для запам'ятовування порівняно із іншими шрифтами, що розглядаються на рисунку 1, а найвища швидкість читання характерна для тексту, набраного Book Antiqua.

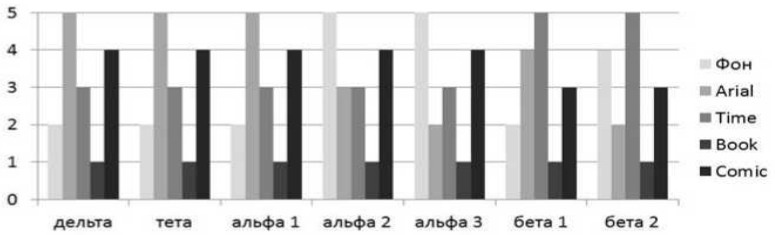


Рис. 1. Рангові значення відносних потужностей спектрів електроенцефалограм людини при читанні різних типів гарнітур

Розглянемо інші види шрифтів [1]. Є шрифти, які зарекомендували себе як універсальні, оскільки практика показує їх багатофункціональність. Наприклад, до такого типу можна віднести гарнітури: Officina, Meta, FreeSet, Lucida. “Модні” або “стильні” шрифти доцільно застосовувати тільки у виняткових випадках. Вони бувають нечитабельні у відносно великих за об’ємом текстах, наприклад це шрифти: LetterGotic, Letterhead, Europe, Magistral, Perfo. Конструктивістські або кутасті шрифти (гарнітура Rodchenko), якщо не відповідають контексту інформаційного повідомлення, сприймаються неоднозначно і можуть асоціюватися з непохитністю, твердістю, механістичністю, а іноді з безликістю. Моноширинні шрифти (з однакової товщиною штрихів), наприклад Courier, LetterGotic, Optimus, Trixie, Секретар асоціюються зі старими машинописними листами, викликаючи ностальгію. З цієї причини вони є популярними серед адміністративних працівників, а також використовуються в професійному програмуванні та графічному дизайні. Гротески (шрифти без зарубок): Arial, FreeSet, Pragmatica, Modern, Univers, FranklinGothic, Helios тошо є емоційно нейтральними за умови, якщо вони мають нежирне накреслення. При цьому гарнітура Arial часто використовується в електронній переписці. Рукописні шрифти є оцифрованими під певний почерк, наприклад Mistral, Olga, Nina, Kremlin, MinusMan. Їх використовують з метою показати гарні або близькі відносини між людьми. Акцидентні шрифти незручні для сприйняття при тривалому читанні (використаються в основному для заголовків). Наприклад це шрифти: Bermuda, Rodchenko, Giddyup, Lithos Pro, Hot Sause, FaRer та ін. Занесемо результати проведеного вище аналізу різних видів шрифтів та їх вплив на покращення сприйняття тексту до таблиці 1. Відповідно до цієї таблиці різні типи шрифтів здійснюють різного роду психологічний вплив на людей і таким чином покращують сприйняття поданої за допомогою них інформації для:

- чоловіків;
- жінок;
- невеликих груп людей;
- у випадках відповідності контексту типу шрифту;
- якщо текст відносно невеликого об’єму.

Таблиця 1

Деякі типи шрифтів та особливості їх впливу на покращення сприйняття тексту

Типи шрифтів	Загальний психологічний вплив	Особливості впливу на покращення сприйняття тексту
Прямолінійні, машинні, технічні	Привабливі для чоловіків	Впливають на чоловіків
Декоративні, пластичні, заокруглені	Привабливі для жінок	Впливають на жінок
Універсальні	Привабливі для чоловіків і жінок	Впливають на чоловіків і жінок
Конструктивістські або кутасті	Сприймаються однозначно	Впливають, якщо відповідають контексту
Модні (стильні)	Привабливі відповідно до моди	Впливають, якщо текст невеликого об’єму
Моноширинні	Викликають відчуття ностальгії	Призначені для адміністративних працівників, в професійному програмуванні та графічному дизайні
Гротески	Емоційно нейтральні за умови, якщо вони мають нежирне накреслення	–
Рукописні шрифти	Виражають гарні або близькі відносини	Впливають на невеликі групи людей

Різні типи шрифтів можуть використовуватись у різних сферах людської діяльності [1]. Так у

діловій переписці використовується більшість шрифтів і вони повинні відповідати контексту подій, що описуються. Тут часто застосовуються гарнітури Times New Roman, Helvetica, Palatino, Frutiger, Zapf, Adonis. У документах, наприклад, вибір шрифту в автобіографії або заяві про прийняття на роботу недоречно підібраний шрифт може викликати недовіру. Основними критеріями при виборі гарнітури в даному випадку є її простота і сприйнятливість. Тут можуть використовуватись антикви (Times, Times New Roman, Palatino, Garamond, Bodoni, Lazurski,Bannikovskaja та інші) для претендентів на більш консервативні або традиційні посади, а гротески (Helvetica, Verdana, Arial, Pragmatica, Modern, Univers, FranklinGothic, FreeSet) – коли автору бажано створити відчуття сучасності при зверненні до молодих фірм. У листах з позитивними емоціями мають бути шрифти із світлими накресленнями та, можливо, якісь особливі шрифти. Наприклад, у листі, що містить подяку або поздоровлення можна використати: Helios Condenced, ITC Eras, ITC Kabel, Humanist 531 Book, Lucida Sans, Kremlin та інші. Таким чином різні типи шрифтів здійснюють різного роду психологічний вплив на людей також у різних сферах їх діяльності і можуть покращувати сприйняття поданої за допомогою них інформації.

Вважається, що у сприйнятті текстового матеріалу людиною важливу роль відіграє розмір шрифту, що також певним чином позиціонує автора. Так, наприклад А. Сігман вважав [1], що відносно дрібний (11 пунктів) шрифт створює відчуття більшої довірливості та важливості інформації. А відносно великий шрифт може використовуватись у дитячий літературі та для акциденції у тексті [3]. Найзручніше на моніторі читаються кеглі 10–12. Шрифти більшого чи меншого розміру сповільнюють читання й тому збільшують втомлюваність користувачів [4]. Питання вибору розміру шрифту може вирішуватись залежно від особливостей функціонального стану людини та у зв'язку із цим здатності краще сприймати нею шрифт певного розміру. З цією метою в роботі [5] запропоновано використовувати програмний модуль для керування представленням інформації в системі електронного навчання, а саме для керування розміром шрифту.

Дуже важливе значення для сприйняття інформації має колір шрифту. Відповідно до впливу кольору (таблиця 2) на людину [6] можна використовувати його для досягнення поставлених задач.

Таблиця 2

Відповідність кольору відчуттю та психологічному впливу

Кольори	Відчуття	Психологічний вплив	Відчуття простору
Теплі кольори			
Жовтий	Тепла	Привертає увагу	Віддаляє
Жовтогарячий	Тепла	Привертає увагу, сприяє	Наближає
Рожевий	Тепла	Привертає увагу (в меншій мірі)	Наближає
Червоний	Жари	Виділяється, дуже стомлює	Наближає
Коричневий	Тепла	Стомлює	Наближає
Холодні кольори			
Сірий	Прохолоди	Не привертає увагу, не стомлює	Віддаляє
Блакитний	Холоду	Не стомлює	Віддаляє
Зелений	Прохолоди	Розслаблює	Віддаляє
Фіолетовий	Свіжості	Дезінтегрує	Наближає

При цьому важливе значення представляють результати аналізу впливу кольорів на процеси мислення [6]. Відповідно до зазначених досліджень «холодні» кольори викликають гальмування й знижують ефективність розумової діяльності, навпроти, «теплі» кольори «активної сторони» поліпшують розумову діяльність, підвищують її продуктивність. Однак за результатами опитування студентів фізико-математичного факультету одного з університетів виявлено [7], що найбільша перевага віддається програмним навчальним продуктам, інтерфейс яких має «нульову температуру» у колірному відношенні, тобто «холодні» і «теплі» кольори урівноважують один одного. При цьому абсолютна більшість респондентів виявляло негативне відношення до багатоколірності оформлення. Також при вивченні динаміки колірних переваг [7] випробуваних у процесі рішення поставлених завдань було встановлено, що зміна типу колірного вибору в процесі рішення завдання несе інформацію про можливий успіх, або невдачі. Так успішне рішення завдання асоціюється з яскравими, світлими відтінками. Крім того, колірні асоціації можуть мати тематичну спрямованість. Наприклад, червоний у техніці символізує небезпеку, у сфері моди – сміливість, у сфері соціальних дисциплін асоціюється з революціями або війнами.

При цьому кольори шрифту у співвідношенні його з фоном є не менш важливим фактором кращого сприйняття тексту, розглянемо це [8]. Чим більша контрастність кольорів шрифту та фону, тим простіше читати текст. При цьому необхідно знати правила сполучення кольорів. Погано комбінувати, наприклад, фіолетові букви на сірому фоні, жовті – на білому. Проте легко читаються жовті шрифти на синьому фоні. Важливо також не використовувати занадто багато кольорів та знаходити тут певну гармонію. На одному слайді, листку паперу бажано використовувати не більше двох або трьох кольорів. У спрощеному випадку (використання чорного і білого кольорів) для поверхонь, які відбивають світло, таких як папір, найкращим є поєднання чорного тексту і білого фону. Для поверхонь, які випромінюють світло, наприклад екрани моніторів, навпаки найкращий варіант – світлий текст на темному фоні. Така ситуація пояснюється тим, що

світло, яке випромінюється світлим фоном на моніторі, заважає оку фіксувати погляд на темних частинах тексту. Разом з тим варто враховувати [7], що в ряді випадків психоемоційний вплив кольорів може бути діаметрально протилежним загальноприйнятому внаслідок різних асоціацій, які можуть бути як індивідуальними (заснованими на особистому досвіді конкретної людини), так і мати національне, релігійне, політичне походження. При цьому колір має власне символічне значення, що залежить від культурної традиції. Наприклад, на Сході кольори смерті – білий, а на Заході – чорний. Пояснюється це різними релігійними тлумаченнями. На сході до смерті ставляться як до переходу на новий, більше духовний рівень розвитку, перевтілення, а на заході – як до закінчення земного існування, смерті взагалі.

Щодо зарубок на шрифті то згідно з опитуванням відсутність зарубок робить шрифт більш зручним для сприйняття і читання, але для багатьох видів тексту протирічить звичкам та робить його застосування недоречним [9]. Важливим параметром шрифту також є його жирність. Дослідження різних авторів показують [9], що даний параметр традиційно використовується для виділення тексту в «фігуру» на фоні іншого тексту з метою залучення уваги. Жирні шрифти можуть також сприйматися як «важкі» і «ґрунтовні» і можуть бути використані для реклами масивних товарів. Так підвищення жирності шрифту Times New Roman суб'єктивно сприймається як акцентування важливості інформації (82% опитаних); серйозності (78% опитаних) і відповідальності (76% опитаних). У ділових документах підвищення жирності шрифту створювало враження непоступливості, обов'язковості й точності виконання всіх інструкцій.

Проведений вище аналіз стосується безпосередньо особливостей сприйняття параметрів окремих символів. Визначимо особливості сприйняття визначених груп символів, а саме більших за розмірами складових одиниць тексту, зокрема слів та речень. Тут може розглядатися декілька питань. Це стосується, зокрема, відстаней між буквами й рядками [12]. Вказані показники шрифтових композицій традиційно використовувалися для виділення важливих фрагментів тексту, залучення уваги, а також поділу не зв'язаних за змістом частин тексту. Отже відстань між буквами й рядками відповідає принципам виділення «фігури» з «фону». Так сприйняття тексту у якому літери представлені без пробілів здійснюється з ускладненнями, але добре знайома фраза включена в цей текст прочитується скоріше. Зменшення відстані між буквами в частині текстового повідомлення може призводити до виділення «фігури», тобто найбільш значущих фрагментів. Але цієї ж функції можна досягти і збільшенням відстане між літерами, що часто застосовується в заголовках або визначеннях. Щодо вирівнювання тексту на сторінці, то рекомендується вирівнювати текст тільки по лівому краю. Доведено, що нерівні праві краї колонки тексту допомагають людям фіксувати погляд. Тому не варто вирівнювати абзаци по двох боках, роблячи всі рядки однакової довжини. Гірший варіант для сприйняття – вирівнювання тексту по центру. Особливо це стосується рядків різної довжини. Стовпчики тексту, які мають ширину більшу за 50–70 символів читати важко.

Особливе місце у покращенні сприйняття текстових матеріалів відіграє питання ритму у шрифті та тексті, а також загальна макроструктура матеріалу, що подається [10]. Так шрифт, підкоряючись всім закономірностям ритму, впливає на людину, викликаючи той або інший настрій (рис. 2). Ритм активізує або гальмує сприйняття, впливає на складність читання і образність форми. За емоційним сприйняттям ритмічний лад тексту може бути простим і складним, статичним і динамічним, урівноваженим і неспокійним. Порушення ритмічних зв'язків викликає враження подільності, випадковості, сприяє втраті цілісності композиції. І навпаки гармонійна побудова матеріалу допомагає читанню, доставляє зорове задоволення. При цьому речення різної довжини можуть створювати різний ритм [11]. Ритм тексту визначається поєднанням речень, які мають деяку довжину. Так набір речень однакової довжини з 10–15 слів, створює враження монотонності та одноманітності. Найбільш вдалим є ритм, що створюють речення: довге, коротке, дуже коротке, трохи довше. При цьому середня довжина речень не повинна перевищувати 20 слів. Ідеально, якщо це буде 12–15 слів.

Рис. 2. Приклад ритмічного строю шрифтів різного накреслення

Важливе значення також має загальна макроструктура матеріалу, що подається [10]. Макроструктура, що залишається незмінною протягом досить тривалого часу служить гарним стимулом сприйняття, тому що принцип сталості структури відповідає звичкам і очікуванням глядача, а також полегшує процес виявлення й засвоєння шуканої інформації. Вирішуючи це завдання, варто звертати увагу на те, щоб постійне оформлення не викликало почуття монотонності, а кожний тематичний розділ, маючи індивідуальне трактування, не порушував цілісності структури всього оформлення. Основні тематичні розділи, як правило, мають свої найменування у вигляді самостійних змістів або рубрик. Для їхнього графічного вираження служать заголовочні шрифти. З метою забезпечення стильової єдності між компонентами шрифтового оформлення заголовки, підзаголовки й тексти переважно виконуються шрифтами якогось одного типу, але розрізняються за накресленням, щільністю або насиченістю. Це дає необхідний діапазон значеннєвих акцентувань при побудові тієї або іншої текстової інформації, що загалом оформлена у одному стилі. Для кращого засвоєння матеріалу потрібно дотримуватись певних традиційних

підходів. Наприклад блакитний підкреслений текст є стандартом для зображення посилань. Не бажано змінювати це правило без вагомих причин. Взагалі для кращого сприйняття тексту не рекомендується використовувати велику кількість шрифтів, кольорів і розмірів. Потрібно уникати абзаців тексту у верхньому регістрі.

Важливим є також місце розташування інформаційних повідомлень на аркуші паперу або екрані монітора. З цією метою, наприклад у [13] здійснювалося експериментальне тестування користувачів комп'ютерів, щоб виявити місця найкращого сприйняття поданого текстового та графічного матеріалів відповідно до так званої тестової сітки. На цій тестовій сітці місця розташування матеріалу умовно позначені точками із латинськими літерами (рис. 3). Таким чином на основі проведених досліджень було виявлено, що для кращого сприйняття поданого матеріалу необхідно дотримуватися принципів його просторової організації. При цьому потрібно розташовувати ідеографічну інформації по спадній діагоналі – з лівого верхнього кута в правий нижній. Ідеографічну інформацію, що відбиває статику досліджуваного об'єкта (або інформацію меншого рівня абстракції) необхідно розміщати в лівому верхньому куті екрана, а динамічну інформацію (або інформацію більше високого рівня абстракції) – у правому нижньому куті. Також потрібно розміщати текстову інформацію по висхідній діагоналі – з нижнього лівого кута у верхній правий (рис. 4). При цьому текстову інформацію, пов'язану із практичними діями, варто розміщати в лівому нижньому куті, а ту, що відбиває вихідні дані об'єкта – у правому верхньому куті. Також потрібно розташовувати інформаційні повідомлення зворотного зв'язку в центральній зоні екрана.

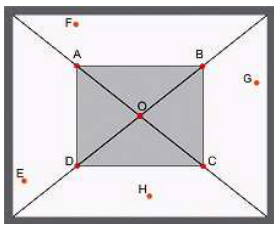


Рис. 3. Тестова сітка для визначення місць найкращого сприйняття текстових та графічних матеріалів

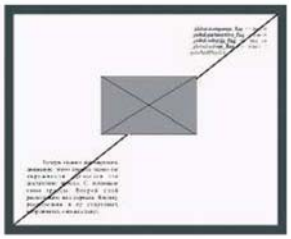


Рис. 4. Зразок розміщення текстової інформації по висхідній діагоналі на тестовій сітці

Поряд із наведеним вище існують дослідження, наприклад [14], що також визначають найбільш зручне для читання розташування інформації на сторінці чи екрані монітора. Це може здійснюватися за допомогою ай-трекінгу тексту. Ай-трекінг – процес визначення траєкторії руху очей. Таке відслідковування погляду людини дає можливість розташовувати найважливіші елементи сторінки в найкращих для сприйняття позиціях. При цьому дослідження Якоба Нельсона показали, що на екрані монітора найбільш часто переглядається матеріал розташований зліва на сторінці. А погляд рухається за траєкторією, що схожа на англійську літеру F (рис. 5, рис. 6). На рисунку 6 по вісі абсцис наведена кількість пікселей від лівого краю монітора, а по вісі ординат – відсоток від часу перегляду.

Рис. 5. Ай-трекінг на екрані монітора із зонами світлого відтінку на які найбільш часто спрямовується погляд при читанні сторінки

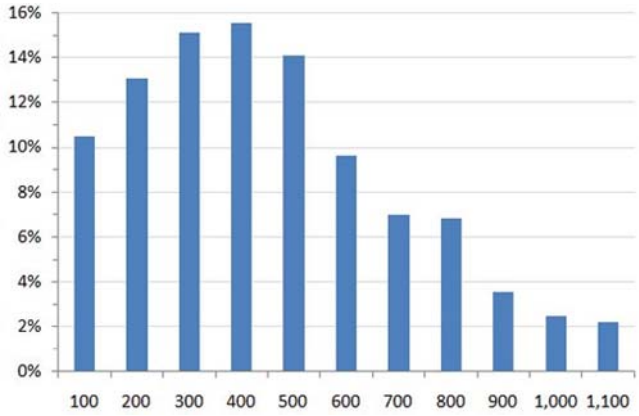


Рис. 6. Розмір зон у пікселях на екрані монітора на які спрямовується погляд при читанні сторінки

Для кращого сприйняття графічного та текстового друкованих матеріалів [10], а також загалом матеріалів на сайтах [15] може також використовуватись принцип так званого “золотого перетину”, що отримав широке застосування у техніці [18]. При формуванні, наприклад, електронної сторінки сайту це може передбачати розбиття її на частини, що пропорційні “золотому перетину”, а також частини пов’язані із числами Фібоначі або “золотою спіраллю”.

Розглянемо більш детально деякі особливості сприйняття тексту залежно від змісту, що закладений у ньому. Так, наприклад, на сприйняття інформації впливає простота речень з точки зору їх змісту [11]. В одному реченні повинно бути висвітлений один образ або одна ідея. Речення повинні бути тільки трохи більшими ніж підмет, присудок і доповнення. Короткі речення забезпечують витонченість і швидкість викладення інформації. Вони допомагають досягти ясності. Так, речення довжиною 8 слів і менше читаються дуже легко. А речення з 29 слів дуже важко сприймати. Більш узагальнену думку необхідно оформлювати у вигляді параграфу. Не менш важливо слідкувати за довжиною параграфів – вона повинна бути невеликою. Середня довжина параграфу тексту визначається поділом загального числа слів у тексті на число параграфів. Одним з способів утримувати довжину параграфу малою – це обмежити параграф 3-4 реченнями. На сприйняття тексту впливають використання заголовків та підзаголовків. Вони можуть суттєво покращити таке сприйняття. Достатнім буде 2-3 рівня підзаголовків. Обережно тут потрібно використовувати виділення «курсивом», «жирним», «великі букви».

Якість сприйняття, а потім і засвоєння змісту поданого матеріалу, наприклад навчального, може визначатися на основі різного роду методів, зокрема методів ітеративного навчання з побудовою відповідних кривих, що його характеризують (рис. 6). Ітеративне навчання може передбачати розбиття матеріалу на певні частини, фрагменти для кращого його опрацювання. На рисунку 6 представлені криві, що у деяких загальних випадках характеризують процес ітеративного навчання з точки зору об’ємів *x(t)* опрацьованого матеріалу, що відкладений по вісі ординат від часу *t*, що відкладається по вісі абсцис.

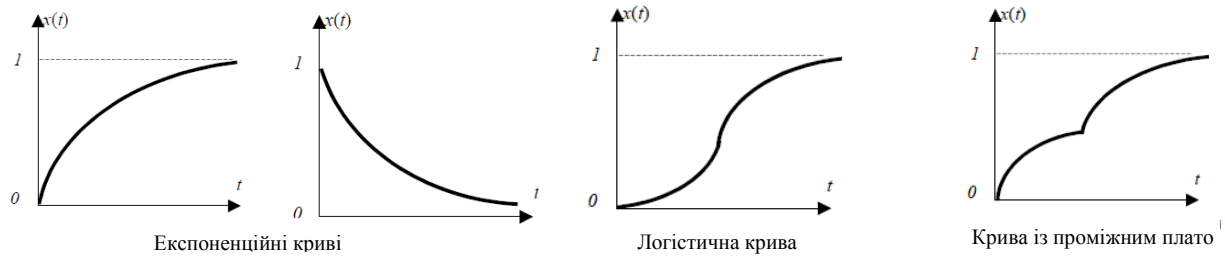


Рис. 7. Деякі типи нормованих кривих ітеративного навчання

Загалом оцінювати якість сприйняття різного роду матеріалів можна на основі визначення швидкостей читання, запам’ятовування тощо [2].

Для того, щоб відносно невеликий об’єм текстового та графічних матеріалів сприймався максимально швидко, що стосується не тільки окремих його фрагментів, а і всього його об’єму в цілому у тому числі загальної його ідеї необхідно використовувати інфографіку [16]. Приклад використання інфографіки наведений на рис. 8 [16].

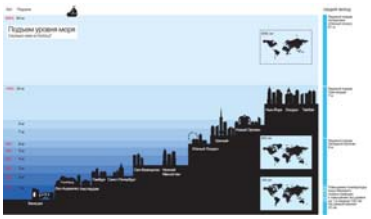


Рис. 8. Приклад використання інфографіки

При створенні інфографіки потрібно дотримуватись певних правил. Отже, для кращого сприйняття поданого текстового і графічного матеріалів необхідно: створити точку зосередження уваги, використовувати зрізи на зображеннях, зробити інформацію красивою, не захоплюватися стовпчиковими діаграмами, використовувати повтори ключових зображень, розкривати зміст у зображеннях та ін. Загальною рисою всіх варіантів представлення інфографіки є здебільшого вертикальна прямокутна форма. Така форма вважається більш привабливою і дозволяє легко додавати потрібну інформацію в подальшому.

Визначимо рекомендації, на основі яких можна покращити сприйняття різного роду друкованих або електронних текстових матеріалів із зображеннями. Для цього спочатку узагальнимо результати проведеного вище аналізу. Потім визначимо фактори, що впливають на засвоєння вказаних матеріалів та занесемо їх до таблиці 3. Отже, для кращого сприйняття текстових матеріалів із зображеннями виходячи з їх зовнішнього вигляду, з урахуванням факторів наведених у таблиці 3, необхідно дотримуватись таких основних рекомендацій:

- виконати змінення зовнішнього вигляду окремих символів тексту;
- виконати змінення зовнішнього вигляду груп символів;
- намагатися спростити зміст повідомлення, що міститься у одному реченні, і таким чином спростити
- зміст абзацу, параграфу, тощо, що у свою чергу впливає на форму подання матеріалу;
- дотримуватися відповідних місць розташування текстових матеріалів і зображень;
- дотримуватися традицій та стилів.

Виділимо із перелічених чинників, що покращують сприйняття матеріалів такі більш узагальнюючі чинники (наведені у таблиці 3):

- основні, що пов’язані із зміною параметрів окремих символів та різного роду груп символів у тому числі з урахуванням змісту матеріалу;
- додаткові, що пов’язані наприклад, із дотриманням окремих традиційних підходів, місць вставки зображень у текст тощо.

Таблиця 3

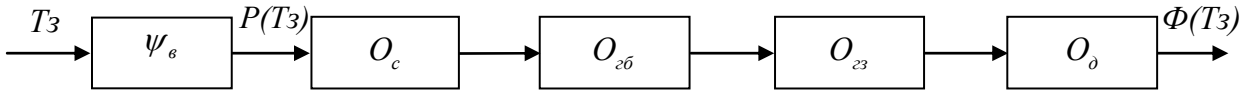
Фактори, що впливають на покращення сприйняття матеріалу

Фактор впливу	Зміст впливу
Основні чинники	
Параметри окремих символів тексту	
Типи шрифтів	Різний психологічний вплив залежно від типу шрифту
Розмір шрифту	Визначає простоту (складність) читання тексту. Зміна розміру шрифту фрагменту виділяє його у тексті
Верхній регістр	Визначає простоту (складність) читання тексту. Потрібно уникати абзаців тексту у верхньому регістрі
Колір шрифту	Різний психологічний вплив залежно від кольору шрифту
Зарубки на шрифті	Відсутність зарубок полегшує сприйняття і читання
Жирність шрифту	Жирний шрифт виділяє набраний ним текст у “фігуру” на фоні нежирного шрифту.
Співвідношення кольорів шрифту та фону	Контрастність шрифту та фону визначає простоту читання
Параметри груп символів	
Відстані між літерами і рядками	Виділення «фігури» з «фону».
Вирівнювання тексту	Нерівні праві краї колонки тексту допомагають людям фіксувати погляд.
Стовпчики тексту	Стовпці, шириною більша за 50–70 символів читати важко
Ритм у шрифті та тексті	Гармонійна побудова матеріалу допомагає читанню
Макроструктура матеріалу	Принцип сталості структури відповідає звичкам і очікуванням глядача
Місце розташування інформаційних повідомлень та зображень	Різний психологічний вплив. Залежно від місць розташування
Використання заголовків та підзаголовків	Покращують сприйняття тексту. Достатнім буде 2-3 рівня підзаголовків
Фрагменти матеріалу в ітеративному навчанні	Розбиття матеріалу на частини сприяє його кращому сприйняттю.
Деякі характеристики текстових матеріалів, що пов’язані з його змістом, які у свою чергу впливають на форму подання матеріалу	
Зміст речень	Простота речень з точки зору їх змісту визначає їх відносно невелику довжину та краще сприймається
Довжина абзаців	Відносно невелика довжина абзаців краще сприймається

Використання заголовків та підзаголовків	Покращують сприйняття тексту. Достатнім буде 2-3 рівня підзаголовків
Стильова єдність	єдності між компонентами шрифтового оформлення заголовки, підзаголовки й тексти переважно виконуються
Додаткові чинники	
Дотримання окремих традиційних підходів	До традиційних підходів більшість людей вже звикла. Наприклад блакитний підкреслений текст є стандартом для зображення посилань
Параметри зображень у складі текстових матеріалів	
Місце розташування зображень	Різний психологічний вплив залежно від місця розташування

На основі наведених вище міркувань для того, щоб покращити сприйняття текстового матеріалу із зображеннями, узагальнюючи існуючі на теперішній час відповідні підходи, необхідно діяти за таким операторним алгоритмом та блок-схемою:

$$\psi_в : Тз \to O_с \to O_{гб} \to O_{гз} \to O_д ,$$



де $Тз$ – текстові матеріали із зображеннями, при цьому текст поданий у символьному вигляді із довільними початковими параметрами символів та груп символів, що визначають їх зовнішній вигляд; $\psi_в$ – оператор аналізу вигляду наявних матеріалів, $P(Тз)$ – матеріали із визначеними параметрами коригування для подальшого найкращого його сприйняття їх людиною; $O_с$ – операція обробки окремих символів текстових матеріалів із завданням відповідних параметрів для кращого їх сприйняття; $O_{гб}$ – операція обробки груп символів без урахування змісту поданого матеріалу із завданням параметрів для таких груп з метою покращення їх сприйняття; $O_{гз}$ – операція аналогічна попередній, але тут враховується зміст поданого матеріалу; $O_д$ – операція врахування додаткових чинників при поданні матеріалу; $Ф(Тз)$ – матеріали з відповідними параметрами для найкращого їх сприйняття людиною. Описаний вище узагальнений операторний алгоритм та блок схема дозволяють врахувати проаналізовані особливості змінення зовнішнього вигляду текстових матеріалів із зображеннями. Вони також надають можливість поетапного покращення сприйняття таких матеріалів шляхом змінення їх параметрів відповідно до алгоритму.

Висновки

На основі проведеного аналітичного огляду методів покращення сприйняття людиною текстових матеріалів із зображеннями виходячи з їх зовнішнього вигляду узагальнено та класифіковано методи змінення вигляду окремих символів та різних груп символів. При цьому визначено відповідні групи параметрів для зазначених двох типів методів, що дозволяють відкоригувати матеріали для їх найкращого сприйняття людиною. Серед них можна виділити:

- основні, що пов'язані із зміною вигляду окремих символів та різного роду груп символів у тому числі з урахуванням змісту матеріалу;
- додаткові, що пов'язані наприклад, із дотриманням окремих традиційних підходів, місцями вставки зображень у текст тощо.

Сформовано рекомендації щодо поетапного покращення сприйняття текстових матеріалів із зображеннями шляхом змінення їх параметрів відповідно до запропонованого операторного алгоритму та блок-схеми. Це передбачає аналіз параметрів наявних матеріалів із подальшим поетапним коригуванням параметрів для окремих символів, груп символів без у рахування змісту тексту, з урахуванням його змісту та врахування додаткових чинників у тому числі деяких параметрів зображень.

Література

1. Криштопайтис В. В. Шрифт как визуальное средство коммуникации / В. В. Криштопайтис // Вісник ХДАДМ. – 2008. – № 5. – С. 72–77.

2. Морозова Л.В. Психофизиологическая специфика восприятия печатного шрифта / Л.В. Морозова, И.Н. Мурін // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. – 2013. – № 3. – С. 76–86.

3. Кнабе Г. А. Энциклопедия дизайнера печатной продукции. Профессиональная работа / Кнабе Г. А. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 736 с.

4. Mills C. B. & Weldon L. J. (1987). Reading test from computer screens. ACM Computing Surveys, 19 (4), 329–358.

5. Варнавский А. Н. Программный модуль для управления представлением информации в системе электронного обучения / А. Н. Варнавский // Образовательные технологии и общество. – 2015. – Т. 18, № 4.

– С. 697–707.

6. Базыма Б. А. Психология цвета: теория и практика / Б. А. Базыма. – М. : Речь, 2005. – 205 с.

7. Никулова Г.А. Цветовое оформление учебных материалов и его влияние на восприятие информации / Г.А. Никулова // Вестник Пермского государственного педагогического университета, серия «Информационные компьютерные технологии в образовании». – 2006. – Вып. 2. – С. 77–84.

8. Пухальская В.Г. Выбор шрифта для оформления лекционной презентации / В.Г. Пухальская, А.Д. Ефремов, А.Ю. Кулинкович // Здровье и образование в 21 веке. – 2015. – Vol. 17. No 3.

9. Новикова Е.Ю. Психология восприятия шрифта / Е.Ю. Новикова // Дизайн. Теория и практика. – 2015. – № 19. – С. 31–40.

10. Смирнов С.И. Шрифт и шрифтовой плакат / Смирнов С.И. – М. : Плакат, 1977. – 148 с.

11. Воржева Ю. С. Психологічні особливості сприймання тексту / Ю. С. Воржева // Кваліїогія книги. – 2010. – № 2(18). – С. 22–26.

12. Психология восприятия шрифтов или как управлять настроением потребителей [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://koloro.ua/blog/dizain/psihologia-vospriyatiya-shriftov-ili-kak-upravlyat-nastroeniem-potrebiteley.html.

13. Андреева О. Н. Изучение эффективности распознавания изображения в различных зонах экрана монитора для успешного введения интерактивного учебного процесса / О. Н. Андреева // Образование и наука. – 2011. – № 8. – С. 85–93.

14. Нильсен Я. Веб-дизайн: анализ удобства использования веб-сайтов по движению глаз = Eyetracking Web Usability / Якоб Нильсен, Кара Перниче. – М. : «Вильямс», 2010. – С. 480.

15. Компьютерная графика для Интернета / [Владимир Молочков и др.]. – М. : Питер, 2004. – 368 с.

16. Маккэндлесс Д. Инфографика. Самые интересные данные в графическом представлении / Дэвид Маккэндлесс. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2013. – 264 с.

17. Новиков Д. А. Закономерности итеративного научения / Новиков Д. А. – М. : Інститут проблем управления РАН, 1998. – 77 с.

18. Багатоканальні ІВС опрацювання стрибкоподібних сигналів на базі АЦП із ваговою надлишковістю : монографія / О. Д. Азаров, А. В. Снігур ; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 138 с.

References

1. Kryshtopaytys V. As vyzualnoe funds kommunikaczii // Bulletin KSADA, 2008. – № 5. – P. 72–77.

2. Morozova L.V., Murin I. N. Specificity Psyhofyzyolohycheskaya perception printed font // Vestnik North (Arctic) Federal University. – 2013. № 3. – P. 76–86.

3. Knabe GA Encyclopedia pechatnoy designer products. Professyonalnaya work. – M.: Publishing Home "Williams", 2006. – 736 p.

4. Mills C. B. & Weldon L. J. (1987). Reading test from computer screens. ACM Computing Surveys, 19 (4), 329–358.

5. Varnavskyy A.N. Other software module for the management of information in the presentation of learning electron system / A.N. Varnavskyy // Obrazovatelnye technology and society. – 2015. – Vol 18, № 4. – P. 697–707.

6. Bazima B.A. Psychology Colors: Theory and Practice / B.A. Bazima. – M.: Speech, 2005. – 205 s.

7. Nykulova G.A. COLOR oformlenye uchebnyh materials & its Influence on the Perception of information / G.A. Perm Nykulova // Bulletin of the State pedagogical University, Series "Clearing Computer technologies in education". – 2006. – Vol. 2. – P. 77–84.

8. Puhalskaya V., Efremov A.D., Kulynkovych A. Choice of font for oformlenyya lektsyonnoy presentation Zdrove and Education in the 21st century 2015. Vol. 17. No 3

9. Novikov E.Y. Psychology of perception // font design. Theory and Practice, 2015, number 19, s. 31–40.

10. Smirnov S.I. Font and shryftovoy. N.: placard poster, 1977. – 148 p.

11. Vorzheva S. Psychological characteristics of perception Text / S. Vorzheva // Kvalilohiya book. – 2010. – № 2 (18). – P. 22–26.

12. Novikov E.Y. Psychology of perception // font design. Theory and Practice, 2015, number 19, s. 31–40.

13. Study of the effectiveness raspoznavanyya Picture in DIFFERENT areas Screen Monitor for successful process of administering a ynteraktyvnoho uchebnoho / O. Andreeva // Education and Science. – 2011. – N 8. – S. 85–93.

14. Jacob Nylsen, Kara Pernyche. Web Design: Using udobstva analysis of web sites on the motion G = Eyetracking Web Usability. – M.: "Williams", 2010. – P. 480.

15. Kompyuternaya Graphics for Internet / Vladimir Molochkov. – M. et al., Peter, 2004. – 368 p.

16. David McCandless. Infographics. Samye Interesting Data in the presentation of hrafycheskom. – M.: Mann, Ivanov and Ferber, 2013. – 264 p.

17. Novikov D.A. Law of iterating learning. – M.: Institute of Control Sciences, 1998. – 77 s.

18. Multi IMS intermittent signal processing based on ADC with weight redundancy: monograph / O.D. Azarov, A.V. Snigur; The winery. nat. Sc. Univ. – Ball: Universum, Vinnitsa, 2008. – 138 c.

Рецензія/Peer review : 12.04.2017 р. Надрукована/Printed :03.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Перевозніков С. І.

УДК 004.62

Д.М. МЕДЗАТИЙ, А.Б. КРИВЕНКО, С.С. НОЖЕНКО
Хмельницький національний університет

WEB-СЕРВІС ПІДТРИМКИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРАКТИК СТУДЕНТІВ ІТ-СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

В статті описано підхід до розв'язання задачі підбору оптимальної команди розробників з числа студентів ІТ-спеціальностей для виконання навчальних проектів з розробки програмного забезпечення. На основі даних про навички та рівень підготовки потенційних кандидатів забезпечується підбір оптимальної команди за вказаними критеріями та у відповідності до опису і вимог проекту. Описаний підхід реалізовано у веб-сервісі підтримки організації виробничих практик для студентів ІТ напрямків «praktiki.net».

Ключові слова: навчання, виробнича практика, розробка програмного забезпечення.

D.M. MEDZTYI, A.B. KRIVENKO, S.S. NOZHENKO
Khmelnytsky National University

WEB-SERVICE FOR THE SUPPORTING OF ORGANIZATION OF PRACTICAL TRAINING FOR THE STUDENTS OF IT-SPECIALITIES

In the article an approach for solving the problem of creating optimal development team from the students of IT specialties to perform training software development projects has been described. The approach takes in to account the level of skills of potential candidates, description and requirements of the project and ensured optimal selection criteria for project team creating. The approach was implemented in a web service «praktiki.net» that support organization of practical training for students of IT areas.

Keywords: education, practical training, software development.

Вступ

Темп впровадження нових технологій, підходів та засобів розроблення програмного забезпечення, на сьогодні, значно перевищує можливості навчальних закладів України щодо їх впровадження у навчальний процес. Це пов'язано як з проблемами узгодження освітніх програм на рівні університету та міністерства, так і можливостями викладачів швидко та якісно опановувати нові технології та засоби.

Разом з тим, підвищення якості практичної підготовки студентів – одна із основних вимог роботодавців. Реагуючи на вимогу сьогодення, вищі навчальні заклади змушені приділяти більшу увагу практичній підготовці, для того, щоб студент-випускник витрачав мінімум часу на адаптацію та якнайшвидше починав ефективно працювати. Тому актуальним питанням для вищих навчальних закладів є налагодження діалогу з роботодавцями для модернізації та осучаснення освітніх програм підготовки фахівців. У останній редакції закону про Вищу освіту [1] вищим навчальним закладам надано більше свободи при формуванні освітніх програм. Тому, підготовка фахівців може проводитись з врахуванням потреб регіону.

На сьогодні у місті Хмельницькому беззаперечним лідером за кількістю працевлаштованих за спеціальністю випускників вищих навчальних закладів є компанії з розроблення програмного забезпечення. Ця галузь є найбільш привабливою за своєю рентабельністю, оскільки не вимагає великих капіталовкладень в складне та вартісне високотехнологічне обладнання. Враховуючи складність швидкого впровадження сучасних технологій у навчальний процес, єдиним виходом для підвищення рівня володіння практичними навичками у студентів є активне залучення роботодавців до цієї роботи. Одним з видів такого залучення є проведення практик студентів: виробничої та переддипломної. Основними проблемами організації таких практик та активного залучення до цих процесів підприємств регіону є:

- фіксований термін їх проведення (як правило, компанії не володіють вільним людським ресурсом для організації керівництва практикою, тому для них більш прийнятним є варіант отримання практикантів саме у момент наявності вільного (менш завантаженого) співробітника – керівника практики);
- складність узгодження тематик та базових технологій (визначена ВНЗ тематика практики не завжди узгоджується з інтересами компаній та напрямком діяльності керівника від підприємства);
- різний рівень підготовки студентів (зазвичай, кожна окрема компанія приймає на практику декількох студентів, з наступним їх об'єднанням у одну команду, особливо це актуально для практик з розроблення програмного забезпечення, однак різний рівень підготовки студентів значно зменшує ефективність такої практики).

Для вирішення вказаних проблем та з метою підвищення ефективності практичної підготовки студентів ІТ спеціальностей розроблено спеціалізований веб-сервіс. Даний веб-сервіс має на меті спрощення налагодження взаємозв'язку між навчальними закладами, підприємствами і студентами, та підвищення ефективності практичної підготовки.

Розроблений веб-сервіс дозволяє студенту самостійно, але за погодженням з керівником від вищого навчального закладу, формувати заявку на проходження практики за пріоритетною для нього технологією, а підприємству - формувати пул місць для проходження практик. Остаточне керування розподілом (направленням) студентів на практику реалізується відповідними представниками навчального закладу.

Розроблений сервіс дозволить студентам проходити практику за пріоритетними для них

технологіями, підприємствам забезпечить можливість отримувати більш підготовлених студентів, а для навчальних закладів спростить процедуру розподілу студентів на підприємства для проходження практик.

Постановка задачі

Головною вимогою до веб-сервісу підтримки організації практик студентів є автоматизоване визначення найкращих кандидатів для проходження практики (виконання навчального проекту) у конкретній компанії. Складність цієї задачі полягає в необхідності вибудовувати рейтинг студентів за рядом критеріїв оцінювання та у відповідності до вимог та опису навчального проекту. Отже необхідно: визначити узагальнені функційні вимоги та розробити структуру веб-сервісу, розробити критерії, що визначають рівень володіння студентом базовими технологіями та характеризують інші його навички та вміння, розробити критерії для опису навчальних проектів, які узгоджуються з критеріями оцінювання навичок студента та дозволяють вибудувати рейтинг кандидатів для виконання конкретного навчального проекту.

Опис веб-сервісу підтримки організації виробничих практик

Веб-сервіс передбачає наявність трьох основних груп користувачів (акторів): студент, представник компанії та представник вищого навчального закладу.

Студент, після базової реєстрації отримує доступ та заповнює власний профіль, в якому вказує навчальний заклад за яким він закріплений, подає посилання на профілі у LinkedIn, Github та інших професійних мережах, а також заповнює форму, яка повинна надати первинне представлення про рівень підготовки студента та знання базових технологій розробки програмного забезпечення. Після цього, студенту пропонується заповнити форму з інформацією про стек технологій за яким студент хотів би пройти практику на підприємстві. Функції доступні актору «студент»:

- реєстрація;
- перегляд та корегування профілю;
- перегляд історії участі у проектах;
- перелік проектів для погодження/підтвердження участі;
- перелік поточних відкритих проектів в яких студент відібраний системою, але очікує остаточного затвердження/погодження з представником компанії;
- перегляд компаній, які зареєстровані в системі;
- робота з повідомленнями – написати/отримати/відповісти представникам компаній або університету.

Представник вищого навчального закладу – це особа, яка уповноважена надавати підтвердження того що зареєстрований студент дійсно навчається у вказаному ВНЗ. Представником ВНЗ здійснюється первинна верифікація поданих студентом даних, а також доповнюється інформація про успішність студента. Функції доступні актору «представник ВНЗ»:

- реєстрація;
- перегляд та корегування профілю;
- підтвердження даних поданих студентами даного ВНЗ;
- перегляд/корегування даних зареєстрованих студентів (наприклад, середній бал);
- перегляд проектів, в яких приймають участь студенти даного університету;
- перегляд списку компаній зареєстрованих в системі;
- перегляд списку зареєстрованих університетів;
- робота з повідомленнями - написати/отримати/відповісти студентам або представникам компаній і університетів.

Представник компанії, яка бажає отримати на практику студентів, після первинної реєстрації та розміщення загальної інформації про компанію, отримує змогу формувати заявки на навчальні проекти. Кожна заявка містить: загальний опис; стек технологій, які планується використовувати при виконанні проекту; очікувану кількість виконавців проекту; дати проведення (коли компанія має можливість прийняти практикантів та виділити їм керівника від підприємства). Функції доступні актору «представник компанії»:

- реєстрація;
- перегляд та корегування профілю;
- формування заявки на проект;
- перегляд проектів зі статусом (відкриті/виконуються/завершені);
- перегляд зареєстрованих університетів;
- перегляд зареєстрованих компаній;
- робота з повідомленнями - написати/отримати/відповісти студентам або представникам компаній і університетів.

Основною функцією веб-сервісу, крім збору даних користувачів та організації їх комунікації через повідомлення, є автоматичне формування рейтингу студентів під кожен поданий навчальний проект компаній. Вирішення цієї задачі потребує формалізації опису вмінь та навичок студентів, а також формалізації подання опису навчальних проектів для подальшого їх узгодження та формування рейтингу найкращих студентів для виконання запропонованого навчального проекту.

Моделі представлення студента та навчального проекту

Визначення оптимальної команди виконавців проектів з розробки програмного забезпечення є доволі складною задачею в наслідок її багатокритеріальної природи [2, 3]. Успішність виконання проекту

залежить від багатьох факторів, однак, одним з основних є команда виконавців, а саме їх фаховий рівень, уміння вирішувати поставлені задачі, знаходити компромісні рішення і таке інше. Формування цілісної команди виконавців – окрема задача [4], яка виходить за межі даної публікації, тому у даній роботі розглянемо представлення студента без врахування їх взаємного впливу та взаємодії у команді. На нашу думку, найбільш вагомими факторами, які впливають на ефективність виконання поставлених задач у межах навчального проекту студентом є: рівень володіння та досвід написання програмного коду різними мовами програмування, рівень володіння супутніми базовими технологіями (наприклад, системи контролю версій, середовища розроблення, засоби відлагодження програмного коду та інше), особистісні характеристики студента, доступність, успішність у навчанні, соціальна активність студента, досвід роботи у проектах з розроблення програмного забезпечення.

Виходячи з вищенаведених факторів, опис студента у веб-сервісі підтримки організацій практики представимо набором множин:

$$S = < C, L, A, M, W, I, E >, \quad (1)$$

де C – множина особистісних характеристик студента, темперамент, комунікабельність, відповідальність та таке інше;

L – множина що описує професійні навички та вміння студента, кожен член множини описує рівень володіння певною технологією, за шкалою від 0 до 9. Залежно від вимог, дана множина містить повний перелік технологій (для опису студента) або (фіксований їх набір при побудові рейтингу для конкретного проекту);

A – рівень доступності студента для роботи над навчальним проектом. У випадку загального представлення студента – множина складається з 56 значень, що відповідають середній кількості годин на тиждень року, які студент може витрачати на виконання навчального проекту;

M – успішність студента, що визначається як:

$$M = \frac{\sum_{i=0}^{n} m_i + U}{2}, \quad (2)$$

де n – кількість профільних дисциплін, m_i – підсумковий бал за i-ю дисципліною, U – показник, що визначає відсоток вчасно виконаних навчальних робіт;

W – активність студента у професійних соціальних сервісах, множина значень, кожне з яких визначає рівень активності студента у професійних сервісах (LinkedIn, Github та інші);

I – персональні дані студента (прізвище, ім’я, вік, стать, місце проживання та інше);

E – досвід студента, представлений як набір даних про попередню участь студента у навчальних проектах, олімпіадах тощо.

Множини, якими описано студента, можуть змінювати кількість параметрів та одиниці виміру залежно від потреб системи та особливостей конкретної задачі.

В свою чергу, для визначення оптимального кандидата для виконання певного навчального проекту, необхідно опис студента співставити з описом та вимогами проекту. Виходячи з моделі представлення студента, мінімально можливий опис проекту визначатиметься як:

$$P = < E, C, L, A >, \quad (3)$$

де E – необхідний досвід виконавців. Показник задається множиною інтервалів, кожен з яких задає задовільні межі досвіду за певними видами діяльності;

C – особистісні характеристики виконавців. За аналогією з попереднім показником, задається множиною, кожне значення якої визначає інтервал та характеризує конкретну особистісну якість кандидата. Цим показником можна знехтувати, але є ряд особливостей проектів, успішність виконання яких залежить, в тому числі, і від особистісних характеристик виконавців;

L – знання мов програмування і базових технологій. Фіксована множина базових технологій, для кожної з яких інтервалом задається очікуваний рівень володіння, за шкалою від 0 до 9;

A – часова доступність кандидата. Для кожного тижня запланованого виконання проекту вказується мінімальна кількість годи роботи.

Формалізовані таким чином описи студента та навчального проекту дозволяють проводити попереднє автоматичне ранжування, та пропонувати компаніям студентів які найбільше підходять для виконання зареєстрованого навчального проекту.

Ранжування проводиться у два етапи. На першому етапі відсікаються усі кандидати які за базовими параметрами не відповідають вимогам, наприклад, недостатній рівень володіння заданою мовою програмування або задекларована менше необхідного рівня кількість годин та таке інше. На наступному етапі, серед кандидатів, які не були відкинуті, проводиться ранжування. Для кожної групи вимог визначається зважений коефіцієнт, з врахуванням вагових коефіцієнтів, які визначають важливість кожного окремого показника. Наприклад, рівень володіння однією з технологій може переважати за важливістю над рівнем володіння іншою. Крім того, на даному етапі допускається врахування інших характеристик студента, що не передбачені описом проекту. На основі отриманих показників формується інтегральний критерій за яким і проводиться остаточне ранжування кандидатів для виконання навчального проекту.

Однак, усвідомлюючи існування ряду інших, менш вагомих факторів при формуванні команди студентів для проходження практики, остаточне рішення щодо запрошення студентів до компанії з метою виконання навчального проекту залишається за представником компанії.

Наступні кроки

Описаний у роботі підхід до підбору студентів успішно реалізований у веб-сервісі «praktiki.net». Разом з тим, досвід використання сервісу вказує на ряд задач, які потребують вирішення та впровадження з метою удосконалення сервісу та підвищення його ефективності. Серед таких задач:

- надання студентам можливості створення власних команд. Працюючи над курсовими та іншими колективними проектами під час навчання, формуються сталі команди студентів, у яких вже налагоджена комунікаційна складова;
- ранжування компаній. Для уникнення зловживань компаніями, які неналежним чином відносяться до організації практик студентів, або намагаються використати студентів у комерційних проектах безоплатно, необхідно ввести додатковий критерій, який дозволить мінімізувати імовірність виникнення таких ситуацій та дозволить кращим студентам потрапляти у кращі компанії;
- введення взаємо оцінювання студентів компаніями та компаній студентами. Такі дані дозволять значно покращити релевантність ранжування як студентів, так і компаній;
- врахування територіального фактору. Значна кількість студентів зареєстрованих у системі проживає поза межами населеного пункту де розташовано їх ВНЗ. Тому для них, оптимальним є підбір компанії для проходження практики з регіону або населеного пункту їх постійного проживання. Це особливо актуально для переддипломної практики.

Висновки

В результаті проведеного аналізу підходів до організації виробничих та переддипломних практик студентів ІТ-спеціальностей виявлено ряд недоліків, які зменшують її ефективність. З метою підвищення ефективності практичної підготовки студентів розроблено веб-сервіс підтримки організації практик студентів. Основною метою розробленого сервісу є налагодження взаємозв'язку між студентами, компаніями та вищими навчальними закладами. Залучення до використання сервісу вищих навчальних закладів дозволяє підвищити ефективність виробничих та переддипломних практик студентів за рахунок попереднього узгодження стеку технологій та автоматизованого розподілу студентів серед компаній.

Для забезпечення можливості отримання компаніями підготовлених студентів для виконання навчальних проектів, в роботі запропоновано набори критеріїв для опису студентів та проектів. Запропоноване представлення дозволяє проводити побудову рейтингу студентів та забезпечує автоматизований підбір кращих кандидатів на виконання навчальних проектів серед зареєстрованих у системі студентів. Наступними кроками при проведенні досліджень у заданому напрямку є розроблення методу формування цілісної команди виконавців, який на основі досвіду спільної роботи, попередньої взаємодії та особистісних характеристик дозволить запропонувати компаніям не окремих студентів, а цілісні команди розробників. Такий підхід сприятиме не лише успішному виконанню навчальних проектів, але і дозволить підвищити імовірність створення старт-апів та нових компаній на базі таких злагоджених команд.

Література

Про Вищу освіту : закон України № 1556-VII // Голос України. – 06.08.14. – № 148.

R. Sangwan, N. Mullick, M. Bass, D. J. Paulish, J. Kazmeier, Global Software Development Handbook, CRC Press, 2006, 626 p.

K. Swigger, F. C. Serce, F. N. Alpaslan, R. Brazile, G. Dafoulas, and V. Lopez. A Comparison of Team Performance Measures for Global Software Development Student Teams. In Proceedings of the 4th International Conference on Global Software Engineering (ICGSE'09), 2009, p. 267–274.

Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), Project Management Institute, Newtown Square, Pennsylvania USA, 2008, 216 p.

References

1. Pro Vyshchu osvitu : zakon Ukrainy # 1556-VII // Holos Ukrainy. – 06.08.14. – # 148.
2. R. Sangwan, N. Mullick, M. Bass, D. J. Paulish, J. Kazmeier, Global Software Development Handbook, CRC Press, 2006, 626 p.
3. K. Swigger, F. C. Serce, F. N. Alpaslan, R. Brazile, G. Dafoulas, and V. Lopez. A Comparison of Team Performance Measures for Global Software Development Student Teams. In Proceedings of the 4th International Conference on Global Software Engineering (ICGSE'09), 2009, p. 267–274.
4. Project Management Institute, A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide), Project Management Institute, Newtown Square, Pennsylvania USA, 2008, 216 p.

Рецензія/Peer review : 12.06.2017 р. Надрукована/Printed :12.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., доц. Мартинюк В.В.

УДК 621.396.96

А.Ю. ВОЛОВИК, О.В. ОСАДЧУК, О.П. ЧЕРВАК, М.А. ШУТИЛО
Вінницький національний технічний університет

ОПТИМАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ПРИ ВИКОНАННІ КОМПЛЕКСНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Однією з нагальних проблем оцінювання стану об'єкта контролю за результатами виконання комплексних спостережень є необхідність врахування несумісності окремих результатів вимірювань через непередбачувану появу систематичних похибок (зсувів). Оскільки у якості основного інструменту оцінювання часто використовують фільтр Калмана, то бажано, щоб метод урахування систематичних похибок був створений у рамках теорії оптимальної фільтрації. Найбільш перспективним виявився метод Б. Фрідланда, згідно з яким розширений фільтр Калмана розділяється на два паралельно працюючі фільтри, один з яких оцінює вектор стану об'єкта контролю за умови відсутності систематичних похибок, а інший оцінює у незалежний спосіб систематичні похибки. У даній роботі доказується, що необхідною умовою вказаної декомпозиції є відсутність стохастичної складової у рівняннях для кореляційної матриці похибок екстраполяції.

Ключові слова: динамічні системи, систематичні похибки, фільтр Калмана, декомпозиція.

A.YU. VOLOVIK, A.V. OSADCHUK, O.P. CHERVAK, M.A. SHUTILO
Vinnytsia National Technical University

OPTIMUM ESTIMATION OF SYSTEMATIC MISTAKES WHEN PERFORMING COMPLEX SUPERVISION

Practical implementation of the program of complex tests assumes use of a significant amount of various measuring means which, as a rule, unite in a uniform measuring complex. One of problems of optimum estimation of parameters of object of control when performing complex supervision is incompatibility of results of separate measurements because of unforeseen emergence of systematic mistakes in the form of shifts. As as the main instrument of estimation Kallman's filter is often used, it is desirable that the method of the accounting of systematic errors would be created within the theory of an optimum filtration. The trivial solution of this problem, consists that for each component of a systematic mistake, the being of interest, the additional variable of a state is entered and then procedure of an optimum filtration for an expanded vector of a state is carried out. Such method is acceptable for dynamic systems of small dimension and a small amount of the considered factors, but for systems of high dimension it is inefficient. A bit different technology allowing to solve a problem of systematic mistakes in a touch subsystem was developed by B. Friedland. He managed to divide the expanded filter of Kallman so that dynamics of a vector of a state and shifts were estimated separately. In this work necessary conditions under which such division is possible are defined, in particular is shown that one of such conditions is equality to zero stochastic component in expression for a covariation matrix of errors of prediction.

Keywords: dynamic systems, systematic mistakes, Kallman's filter, decomposition.

Вступ та постановка задачі

Практична реалізація будь-якої програми комплексних випробовувань передбачає використання великої кількості різноманітних вимірювальних засобів. Наприклад, виконання льотних випробовувань потребує застосування радіолокаційних станцій, різноманітних камер спостереження, системи датчиків кутових координат, датчиків кутових та лінійних швидкостей, акселерометрів та тощо. Як правило, ці засоби об'єднуються в єдиний вимірювальний комплекс, а результати комплексних вимірювань використовуються для якнайкращого (у певному розумінні) оцінювання параметрів траєкторії повітряного судна у режимі реального часу. Саме з такою метою і був розроблений алгоритм фільтра Калмана [1]. Однією з нагальних проблем оптимального оцінювання параметрів траєкторій повітряних суден є необхідність врахування несумісності окремих результатів вимірювань через непередбачувану появу аномальних [2] або систематичних похибок (зсувів). Оскільки основним інструментом оцінювання параметрів траєкторій є фільтр Калмана, то бажано щоб метод урахування систематичних похибок був створений у рамках теорії оптимальної фільтрації. Існує тривіальний шлях розв'язку цієї проблеми, який полягає у тому, що для кожної суттєвої складової систематичної похибки уводиться додаткова змінна стану, а потім виконується процедура оптимального оцінювання для розширеного, таким чином, вектору стану. Проте, якщо навіть враховувати лише один суттєвий зсув у кожному сенсорі, а їх число суттєво перевищує порядок номінальної моделі траєкторії повітряного судна, то розмірність розширеного фільтра Калмана може сягати декількох десятків. Зрозуміло, що використання фільтра Калмана такої розмірності у системах реального часу, щонайменше, є недоцільним. Таким чином, повинна бути розвинена дещо інша технологія, яка дозволила б ураховувати наявність систематичних похибок у сенсорній підсистемі саме у рамках теорії оптимальної фільтрації. Попередньо проведений аналіз літературних джерел [3] виявив декілька можливих підходів до розв'язку даної проблеми, але більшість з них була надалі відхилена чи то з міркувань недостатньої точності оцінювання зсувів, чи то через занадто складну систему розрахунків [4]. Серед тих підходів, що залишилися найбільш перспективним виявився метод, у основу якого покладена оригінальна робота Б. Фрідланда [4]. У даній статті використовуються основні ідеї цієї роботи, проте з дещо іншою метою.

Оцінювання систематичних похибок сенсорної підсистеми методом Калмана

Надалі розглядається лише дискретний варіант фільтра Калмана у припущенні, що номінальна модель динаміки контрольованого об'єкту допускає опис виразом

$$\boldsymbol{x}(k) = \boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{x}(k-1) + \boldsymbol{w}_{\boldsymbol{x}}(k-1), \tag{1}$$

де $\boldsymbol{x}(k)$ – вектор стану динамічного процесу розмірності $(n\times 1)$; $\boldsymbol{A}(k,k\text{-}1)$ – системна матриця розміру

$(n\times n)$; $\boldsymbol{w_x(k)}$ – випадковий вектор розміру $(n\times 1)$, який відображає факт неточного опису реального процесу однорідною частиною рівняння (1). Передбачається, що математичне сподівання випадкового вектору $\boldsymbol{w_x(k)}$ є нульовим, а його кореляційна матриця має вигляд $\boldsymbol{E}[\boldsymbol{w_x(k)}\ \boldsymbol{w}^T{}_x(j)]=\boldsymbol{Q}_x(k)\delta(k,j)$. Результати комплексних вимірювань у будь-який момент часу відображаються алгебраїчним рівнянням

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{b}(k)+\boldsymbol{v}(k), \tag{2}$$

де $\boldsymbol{v(k)}$ – стохастична складова вектора похибок вимірювань, яка має нульове математичне сподівання та кореляційну матрицю $\boldsymbol{E}[\boldsymbol{v(k)}\ \boldsymbol{v}^T(j)]=\boldsymbol{R}(k)\delta(k,j)$; $\boldsymbol{b(k)}$– вектор систематичних похибок розміру $(p\times 1)$, динаміка якого допускає опис різницевим рівнянням

$$\boldsymbol{b}(k)=\boldsymbol{B}(k,k-1)\ \boldsymbol{b}(k-1)+\boldsymbol{w}_b(k-1). \tag{3}$$

Передбачається, що $\boldsymbol{E}[\boldsymbol{w_b(k)}]=0$, $\boldsymbol{E}[\boldsymbol{w_b(k)}\ \boldsymbol{w}^T{}_b(j)]=\boldsymbol{Q}_b(k)\delta(k,j)$. Якщо вектор $\boldsymbol{b(k)}$ приєднати до $\boldsymbol{x(k)}$, то отримаємо розширений вектор стану $z(k)=[\boldsymbol{x(k)},\boldsymbol{b(k)}]^T$. За таких умов динаміка розширеного вектора стану буде відображатися різницевим рівнянням

$$\boldsymbol{z}(k)=\boldsymbol{F}_z(k,k-1)\boldsymbol{z}(k-1)+\boldsymbol{w}_z(k-1), \tag{3}$$

де $\boldsymbol{F}_z(k,k-1)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}(k+1,k) & 0\\ 0 & \boldsymbol{B}(k+1,k)\end{bmatrix}$; $\boldsymbol{w_z(k)}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{w}_x(k)\\ \boldsymbol{w}_b(k)\end{bmatrix}$, а рівняння спостережень матиме вигляд

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{L}_z(k)\boldsymbol{z}(k)+\boldsymbol{v}(k),\quad \boldsymbol{L}_z(k)=[\boldsymbol{C}(k),\boldsymbol{G}(k)]. \tag{4}$$

Якщо позначити через $z^*(k\text{-}1/k\text{-}1)$ оптимальну оцінку вектора стану розширеної системи, то оцінка на момент часу t_k може бути передбачена за формулою $z^*(k/k\text{-}1)=\boldsymbol{F}_z(k,k\text{-}1)\,z^*(k\text{-}1/k\text{-}1)$, а поточна оцінка дорівнює [6]

$$\boldsymbol{z}(k/k)=\boldsymbol{z}^*(k/k-1)+\boldsymbol{K}_z(k)[\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{L}_z(k)\ \boldsymbol{z}^*(k/k-1)], \tag{5}$$

де $\boldsymbol{K}_z(k)=[\boldsymbol{K}_x(k),\boldsymbol{K}_b(k)]^T=\boldsymbol{P}_z(k/k)\ \boldsymbol{L}_z{}^T(k)\ \boldsymbol{R}^{-1}(k)$ – оптимальна матриця передачі розширеного фільтра Калмана. Оскільки кореляційна матриця похибок екстраполяції на один крок уперед визначається виразом

$$\boldsymbol{P}_z(k/k-1)=\boldsymbol{F}_z(k/k-1)\boldsymbol{P}_z(k-1/k-1)\boldsymbol{F}^T{}_z(k/k-1)+\boldsymbol{Q}_z(k-1)$$

де $\boldsymbol{Q}_z(k-1)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Q}_x(k-1) & 0\\ 0 & \boldsymbol{Q}_b(k-1)\end{bmatrix}$, то кореляційну матрицю похибок фільтрації можна обчислювати у рекурентний спосіб

$$\boldsymbol{P}_z(k/k)=[\boldsymbol{P}^{-1}{}_z(k/k-1)+\boldsymbol{L}^T{}_z(k)\boldsymbol{R}^{-1}(k)\boldsymbol{L}_z(k)]^{-1}. \tag{6}$$

За великої розмірності вектора систематичних похибок $\boldsymbol{b(k)}$ безпосередня реалізація розширеного фільтра Калмана (3)–(6) в обчислюваному плані довготривала та недоцільна, особливо за високого темпу оновлення результатів спостережень. Проте Б. Фрідланд [5] шляхом функціонального перетворення рівняння Рікатті зумів розділити розширений фільтр Калмана на два паралельно працюючі фільтри, один з яких оцінював вектор стану номінального динамічного процесу за умови відсутності систематичних похибок $\boldsymbol{x_0}^*(k/k)$, а інший оцінював систематичну похибку $\boldsymbol{b}^*(k/k)$. Підсумкова оптимальна оцінка $\boldsymbol{x}^*(k/k)$ підраховувалась за формулою

$$\boldsymbol{x}^*(k/k)=\boldsymbol{x}^*{}_0(k/k)+\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{b}^*(k/k), \tag{7}$$

де $\boldsymbol{T(k)}$ – матриця розміру $(n\times p)$, яка ще підлягатиме визначенню за певних обмежень на динамічні властивості систематичних похибок. У представленій роботі фундаментальне співвідношення (7) отримується за дещо інших припущень, а саме справедливості принципу суперпозиції для моделей (1)–(3) та лінійності фільтра Калмана. Таким чином, будуть доведені необхідні умови існування співвідношення (7) шляхом аналізу умов, за яких воно може бути справедливим. Зокрема буде показано, що необхідною умовою вказаної декомпозиції є відсутність стохастичної складової $\boldsymbol{Q_b(k)}$ у рівнянні для кореляційної матриці похибок екстраполяції.

Декомпозиція розширеного фільтра Калмана

У загальному випадку, структура розширеного лінійного фільтра рекурентного типу визначається рівнянням (5) для оцінки, де матриця передачі $\boldsymbol{K_z(k)}$ не обов'язково повинна бути оптимальною. Структура оцінки $z^*(k/k)$ допускає її розщеплення на дві складові $\boldsymbol{x}^*(k/k)$ та $\boldsymbol{b}^*(k/k)$:

$$\begin{gathered}\boldsymbol{x}^*(k/k)=\boldsymbol{x}^*(k/k-1)+\boldsymbol{K}_x(k)\boldsymbol{r}_z^*(k/k-1);\quad \boldsymbol{x}^*(k/k-1)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{x}^*(k-1/k-1);\\ \boldsymbol{r}_z^*(k/k-1)=[\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{x}^*(k/k-1)-\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{b}^*(k/k-1)];\end{gathered} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{b}^*(k/k)=\boldsymbol{b}^*(k/k-1)+\boldsymbol{K}_b(k)\boldsymbol{r}_z^*(k/k-1);\qquad \boldsymbol{b}^*(k/k-1)=\boldsymbol{B}(k,k-1)\boldsymbol{b}^*(k-1/k-1). \tag{9}$$

Тепер припустимо, що існує оцінка вектора стану динамічної системи за умови відсутності систематичних похибок, тобто сенсорна підсистема передбачається апріорі справною. Надалі таку оцінку будемо позначати як $\boldsymbol{x_0}^*(k/k)$. Вона також може бути обчислена у рекурентний спосіб

$$\boldsymbol{x}_0^*(k/k)=\boldsymbol{x}_0^*(k/k-1)+\boldsymbol{K}_{x0}(k)\boldsymbol{r}_{z0}^*(k/k-1);\boldsymbol{x}_0^*(k/k-1)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{x}_0^*(k-1/k-1);$$

$$\boldsymbol{r}_{z0}^*(k/k-1)=\left[\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{x}_0^*(k/k-1)\right]. \quad (10)$$

У зв'язку з цим постає питання, за яких умов існує можливість розділу оптимальної оцінки на дві складові

$$\boldsymbol{x}^*(k/k)=\boldsymbol{x}^*{}_0(k/k)+\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{b}^*(k/k). \quad (11)$$

Для з'ясування цього питання уведемо спеціальне позначення для різниці $\boldsymbol{r}_z^*(k/k-1)$

$$\boldsymbol{r}_z^*(k/k-1)=\left[\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{x}^*(k/k-1)-\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{b}^*(k/k-1)\right]. \quad (12)$$

Якщо процес декомпозиції (11) має місце, то підставивши (11) у (12), отримуємо альтернативний вираз для різницевого сигналу $\boldsymbol{r}_z^*(k/k-1)$

$$\boldsymbol{r}_z^*(k/k-1)=[\,\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{x}_0^*(k/k-1)-\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{b}^*(k/k-1)]; \quad (13)$$

де $\boldsymbol{S}(k)=\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{B}(k,k-1)+\boldsymbol{C}(k)\,\boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{T}(k-1)$.

Надалі підставивши вирази (9), (10), (13) у (11), знаходимо

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}^*(k/k)&=\boldsymbol{x}^*(k/k-1)+\left[\boldsymbol{K}_{x_0}(k)+\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{K}_b(k)\right]\boldsymbol{r}_z^*(k/k-1)+\\&+\left[\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{B}(k,k-1)+\boldsymbol{K}_{x_0}(k)\boldsymbol{S}(k)-\boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{T}(k-1)\right]\boldsymbol{b}^*(k-1/k-1).\end{aligned} \quad (14)$$

Якщо припустити, що вирази (8) – (9) описують оптимальний розширений фільтр Калмана, то згідно теореми про ортогональну проекцію [6], випадкові вектори $\boldsymbol{r}_z(k+1/k)$ і $\boldsymbol{b}^*(k/k)$ є статистично незалежними. У той же час для оцінки $\boldsymbol{x}^*(k/k)$ також повинно бути справедливим співвідношення декомпозиції (11). Це означає, що друга складова у виразі (14) має бути відсутньою, тобто

$$\left[\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{B}(k,k-1)+\boldsymbol{K}_{x_0}(k)\boldsymbol{S}(k)-\boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{T}(k-1)\right]=0.$$

Таким чином, декомпозиція розширеного фільтра Калмана можлива, якщо

$$\boldsymbol{K}_x(k)=\left[\boldsymbol{K}_{x_0}(k)+\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{K}_b(k)\right]; \quad (15)$$

$$\boldsymbol{T}(k)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{T}(k-1)\boldsymbol{B}^{-1}(k,k-1)-\boldsymbol{K}_{x_0}(k)\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{B}^{-1}(k,k-1). \quad (16)$$

Провівши детальний аналіз виразу (14) можна переконатись, що довільний лінійний фільтр також може бути зображений у роздільній формі (11) за умови справедливості співвідношень (15) – (16), проте їх ще потрібно доповнити умовою

$$\boldsymbol{x}^*(0/0)=\boldsymbol{x}^*{}_0(0/0)+\boldsymbol{T}(0)\boldsymbol{b}^*(0/0). \quad (17)$$

оскільки процедура декомпозиції повинна виконуватись для усіх k. Доцільно вибирати $\boldsymbol{x}^*(0/0)=\boldsymbol{x}_0^*(0/0)$, $\boldsymbol{T}(0)=0$, тобто припустити, що у початковий момент часу система справна і систематичні похибки відсутні. Таким чином, умови (15) – (17) повністю визначають процедуру декомпозиції довільного лінійного фільтра.

Оцінка наслідків процедури декомпозиції

Наслідки обмежень уведених у (15) можливо оцінити, якщо скористатись припущенням, що усі оцінки $\boldsymbol{x}^*(k/k)$, $\boldsymbol{x}_0^*(k/k)$, $\boldsymbol{b}^*(k/k)$ є оптимальними, тобто отримані за допомогою фільтра Калмана. Як відомо [6], оптимальний матричний коефіцієнт передачі фільтра Калмана, за умови відсутності систематичних похибок, описують виразом

$$\boldsymbol{K}_{x_0}(k)=\boldsymbol{P}_{x_0}(k/k)\boldsymbol{C}^T(k)\boldsymbol{R}^{-1}(k). \quad (18)$$

Кореляційна матриця похибок фільтрації за наявності систематичних похибок повинна обчислюватись за загальною формулою

$$\boldsymbol{P}_{x_1}(k/k)=\boldsymbol{E}\{[\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}_0^*(k/k)-\boldsymbol{T}(k)\,\boldsymbol{b}^*(k/k)]\,[\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}_0^*(k/k)-\boldsymbol{T}(k)\,\boldsymbol{b}^*(k/k)]^T\}. \quad (19)$$

Тепер встановимо зв'язок між кореляційними матрицями $\boldsymbol{P}_x(k+1)$, $\boldsymbol{P}_{x0}(k+1)$, $\boldsymbol{P}_b(k+1)$. Для цього перепишемо рівняння декомпозиції у еквівалентній формі

$$\boldsymbol{P}_{x_1}(k/k)=\boldsymbol{E}\left[\Delta\boldsymbol{x}_1(k/k)\Delta\boldsymbol{x}_1^T(k/k)\right],$$

де

$$\Delta\boldsymbol{x}_1(k/k)=\left[\boldsymbol{x}_0^*(k/k)-\boldsymbol{x}(k)\right]+\boldsymbol{T}(k)\,\boldsymbol{b}^*(k/k) \quad (20)$$

та виконаємо процедуру знаходження математичного сподівання (19). Результат обчислень матиме вигляд:

$$\boldsymbol{P}_{x_1}(k/k)=\boldsymbol{P}_{x_0}(k/k)+\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{P}_b(k/k)\boldsymbol{T}^T(k)-\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)\boldsymbol{T}^T(k)-\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{P}_{bx}(k/k); \quad (21)$$

де

$$\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)=\boldsymbol{P}^T{}_{bx}(k/k)=\mathbf{E}\{[\,\boldsymbol{x}^*(k/k)-\boldsymbol{x}(k)]\,[\,\boldsymbol{b}^*(k/k)-\boldsymbol{b}(k)]^T\}. \quad (22)$$

Матрицю передачі розширеного фільтра Калмана можливо обчислювати за формулою, аналогічною (18)

$$\boldsymbol{K}_z(k)=[\,\boldsymbol{K}_x(k),\boldsymbol{K}_b(k)]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{P}_z(k/k)\,\boldsymbol{L}_z^{\boldsymbol{T}}(k)\,\boldsymbol{R}^{-1}(k)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_{xx}(k/k) & \boldsymbol{P}_{xb}(k/k)\\ \boldsymbol{P}_{bx}(k/k) & \boldsymbol{P}_{bb}(k/k)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{C}^{\boldsymbol{T}}(k)\\ \boldsymbol{G}^{\boldsymbol{T}}(k)\end{bmatrix}\boldsymbol{R}^{-1} \tag{23}$$

.

Підставимо вираз для умовної матриці передачі у першу складову виразу (23), тоді отримуємо

$$\left[\boldsymbol{P}_{xx}\left(k/k\right)\boldsymbol{C}^{T}\left(k\right)+\boldsymbol{P}_{xb}\left(k/k\right)\boldsymbol{G}^{\boldsymbol{T}}\left(k\right)\right]\boldsymbol{R}^{-1}\left(k\right)=\boldsymbol{K}_{x0}\left(k\right)+\boldsymbol{T}\left(k\right)\boldsymbol{K}_{b}\left(k\right). \tag{32}$$

Аналогічна операція застосована до другої складової (23) з урахуванням (18) дозволяє знайти вимоги до умовної матриці передачі

$$\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)\left[\boldsymbol{G}\left(k\right)+\boldsymbol{C}\left(k\right)\boldsymbol{T}\left(k\right)\right]^{T}=\boldsymbol{T}\left(k\right)\boldsymbol{P}_{bb}(k/k)\left[\boldsymbol{G}\left(k\right)+\boldsymbol{C}\left(k\right)\boldsymbol{T}\left(k\right)\right]^{T}. \tag{33}$$

Отже, умова декомпозиції для розширеного фільтра Калмана виконується, якщо накласти наступне обмеження

$$\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)=\boldsymbol{T}\left(k\right)\boldsymbol{P}_{bb}(k/k) \tag{34}$$

З'ясуємо тепер зв'язок виразу (34) з умовною матрицею передачі фільтра $\boldsymbol{K}_z(k)$. Для цього скористаємось відомим виразом для оптимальної матриці передачі розширеного фільтра [6]

$$\boldsymbol{P}_z(k/k)=[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_z(k)\boldsymbol{L}_z(k)]\,\boldsymbol{P}_z(k/k-1), \tag{35}$$

що еквівалентно співвідношенням

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_{xx}(k/k) & \boldsymbol{P}_{xb}(k/k)\\ \boldsymbol{P}_{bx}(k/k) & \boldsymbol{P}_{bb}(k/k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_x\left(k\right)\boldsymbol{C}\left(k\right) & -\boldsymbol{K}_x\left(k\right)\boldsymbol{G}\left(k\right)\\ -\boldsymbol{K}_b\left(k\right)\boldsymbol{C}\left(k\right) & \boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_b\left(k\right)\boldsymbol{G}\left(k\right)\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_{xx}(k/k-1) & \boldsymbol{P}_{xb}(k/k-1)\\ \boldsymbol{P}_{bx}(k/k-1) & \boldsymbol{P}_{bb}(k/k-1)\end{bmatrix}. \tag{36}$$

З виразу (36) неважко знайти складові кореляційної матриці похибок оцінювання за наявності систематичних похибок $\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)$ та $\boldsymbol{P}_{bb}(k/k)$

$$\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)=[\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_x\left(k\right)\boldsymbol{C}\left(k\right)]\boldsymbol{P}_{xb}(k/k-1)-\boldsymbol{K}_x\left(k\right)\boldsymbol{G}\left(k\right)\boldsymbol{P}_{bb}(k/k-1); \tag{37}$$

$$\boldsymbol{P}_{bb}(k/k)=[\,\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}_b\left(k\right)\boldsymbol{G}\left(k\right)]\boldsymbol{P}_{bb}(k/k-1)-\boldsymbol{K}_b\left(k\right)\boldsymbol{C}\left(k\right)\boldsymbol{P}_{xb}(k/k-1). \tag{38}$$

Тепер припустимо, що для умовної кореляційної матриці (34) є справедливим вираз

$$\boldsymbol{P}_{xb}(k-1/k-1)=\boldsymbol{T}(k-1)\boldsymbol{P}_{bb}(k-1/k-1).$$

За цієї умови можна записати

$$\boldsymbol{P}_{xb}(k/k-1)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\boldsymbol{T}(k-1)\boldsymbol{P}_{bb}(k-1/k-1)\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{T}}(k,k-1); \tag{39}$$

$$\boldsymbol{P}_{bb}(k/k-1)=\boldsymbol{B}(k,k-1)\boldsymbol{P}_{bb}(k-1/k-1)\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{T}}(k,k-1)+\boldsymbol{Q}_b(k-1). \tag{40}$$

Підставивши (39)–(40) у (37) та зважаючи на (13), (15) досягаємо результату

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)=\boldsymbol{T}\left(k\right)\left[\boldsymbol{S}\left(k-1\right)-\boldsymbol{K}_b\left(k\right)\boldsymbol{S}\left(k\right)\right]\boldsymbol{P}_{bb}\left(k-1/k-1\right)\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{T}}\left(k,k-1\right)-\\ -\left[\boldsymbol{K}_{x_0}\left(k\right)+\boldsymbol{T}\left(k\right)\boldsymbol{K}_b\left(k\right)\right]\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{Q}_b(k-1);\end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{P}_{bb}(k/k)=[\boldsymbol{B}\left(k,k-1\right)-\boldsymbol{K}_b\left(k\right)\boldsymbol{S}\left(k\right)]\;\boldsymbol{P}_{bb}\left(k-1/k-1\right)\boldsymbol{B}^{\boldsymbol{T}}\left(k,k-1\right)+\\ +[\boldsymbol{I}-\;\boldsymbol{K}_b(k)\boldsymbol{S}(k)]\;\boldsymbol{Q}_b(k-1).\end{aligned} \tag{42}$$

Порівнюючи (41)–(42) можна виявити, що вимога $\boldsymbol{P}_{xb}(k/k)=\boldsymbol{T}(k)\,\boldsymbol{P}_b(k/k)$ може бути виконана лише за відсутності стохастичної складової $\boldsymbol{Q}_b(k)$ у динаміці систематичної похибки, тобто $\boldsymbol{Q}_b(k)=0$. Проте за таких обставин часто буває неможливим надійно гарантувати збіжність оцінок роз'єднаного фільтра Калмана, і не зовсім очевидно, як це обмеження можливо обійти, що може бути об'єктом додаткових досліджень.

Висновки

Для дискретної динамічної системи $\boldsymbol{x}\left(k\right)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\,\boldsymbol{x}(k-1)+\boldsymbol{w}_x(k-1)$, за наявності непередбачуваних систематичних похибок у багатовимірній сенсорній підсистемі

$$\boldsymbol{y}\left(k\right)=\boldsymbol{C}\left(k\right)\boldsymbol{x}\left(k\right)+\boldsymbol{G}\left(k\right)\boldsymbol{b}\left(k\right)+\;\boldsymbol{v}\left(k\right);\qquad \boldsymbol{b}\left(k\right)=\boldsymbol{B}(k,k-1)\;\boldsymbol{b}(k-1)+\boldsymbol{w}_b(k-1)$$

процедура декомпозиції оптимального лінійного розширеного фільтра реалізується у декілька етапів:

1. Формуються оцінки фільтра Калмана, узгодженого з гіпотезою H_0 про відсутність систематичних похибок у сенсорній підсистемі

$$\boldsymbol{x}_0^*\left(k/k\right)=\boldsymbol{x}_0^*\left(k/k-1\right)+\boldsymbol{K}_{x_0}\left(k\right)\left[\boldsymbol{y}\left(k\right)-\boldsymbol{C}\left(k\right)\boldsymbol{x}_0^*\left(k/k-1\right)\right];$$

$$\boldsymbol{x}_0^*\left(k/k-1\right)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\;\boldsymbol{x}_0^*\left(k-1/k-1\right);$$

$$\boldsymbol{K}_{x_0}(k)=\boldsymbol{P}_{x_1}(k/k)\boldsymbol{C}^T(k)\boldsymbol{R}^{-1}(k);$$

$$\boldsymbol{P}_{x_0}(k/k)=[\boldsymbol{P}_{x_1}(k/k-1)+\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{R}^{-1}(k)\boldsymbol{C}^T(k)]^{-1};$$

$$\boldsymbol{P}_{x_0}(k/k-1)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\boldsymbol{P}_{x_1}(k-1/k-1)\boldsymbol{A}^T(k,k-1)+\boldsymbol{Q}_{x0}(k-1).$$

2. Формуються оцінки систематичних похибок

$$\boldsymbol{b}^*(k/k)=\boldsymbol{b}^*(k/k-1)+\boldsymbol{K}_b(k)\left[\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{x}_0^*(k/k-1)-\boldsymbol{S}(k)\boldsymbol{b}^*(k/k-1)\right];$$

$$\boldsymbol{b}^*(k/k-1)=\boldsymbol{B}(k,k-1)\boldsymbol{b}^*(k-1/k-1);$$

$$\boldsymbol{K}_b(k)=\boldsymbol{P}_{bb}(k/k)\boldsymbol{S}^T(k)\boldsymbol{P}^{-1}{}_{rr}(k/k-1);$$

$$\boldsymbol{S}(k)=\boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{B}(k,k-1)+\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{T}(k,k-1);$$

$$\boldsymbol{P}_{rr}(k/k-1)=\boldsymbol{C}(k)\boldsymbol{P}_{x_1}(k/k-1)\boldsymbol{C}^T(k)+\boldsymbol{R}(k);$$

$$\boldsymbol{P}_{bb}(k/k)=[\boldsymbol{P}^{-1}{}_{bb}(k/k-1)+\boldsymbol{S}^T(k)\boldsymbol{P}^{-1}{}_{rr}(k/k-1)\boldsymbol{S}(k)]^{-1};$$

$$\boldsymbol{P}_{bb}(k/k-1)=\boldsymbol{B}(k,k-1)\boldsymbol{P}_{bb}(k-1/k-1)\boldsymbol{B}^T(k,k-1).$$

3. Формуються оптимальні оцінки вектора стану динамічної системи, узгоджені з гіпотезою H_1 про наявність систематичних похибок у сенсорній підсистемі

$$\boldsymbol{T}(k,k-1)=\boldsymbol{A}(k,k-1)\boldsymbol{T}(k-1);$$

$$\boldsymbol{T}(k)=\boldsymbol{T}(k,k-1)-\boldsymbol{K}_{x_0}(k)\boldsymbol{S}(k);$$

$$\boldsymbol{x}_1^*(k/k)=\boldsymbol{x}_0^*(k/k)+\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{b}^*(k/k);$$

$$\boldsymbol{P}_{x_1}(k/k)=\boldsymbol{P}_{x_0}(k/k)+\boldsymbol{T}(k)\boldsymbol{P}_{bb}(k/k)\boldsymbol{T}^T(k).$$

Література

1. Калман Р. Е. Новые результаты в линейной фильтрации и теории предсказания / Р. Е. Калман, Р. С. Бьюси // Техническая механика. – 1961. – Сер. Д. – 83 с.
2. Воловик А. Ю. Оцінювання характеристик функціональної надійності фазового каналу синхронізації в системі посадки сантиметрового діапазону / А. Ю. Воловик, Ю. М. Воловик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 1. – С. 151–154.
3. Agee W. S. The WSM1R Best Estimate of Trajectory – An Overview / W. S. Agee, R. H. Turner // Analysis and Computation Division, White Sands Missile Range, New Mexico, Internal Memorandum. – No. 129. – January 1972. – 44 p.
4. Hsieh C. S. General two-stage Kalman filters / C. S. Hsieh. And F. C. Chen // IEEE Transactions on Automatic Control, 45, 4 (2000), P. 819–824.
5. Friedland B. Treatment of bias in recursive filtering / B. Friedland // IEEE Trans. Autom. Contr. – 1969. Vol. AC. 14. – № 4. – P. 359–367.
6. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс / пер. с англ. ; под ред. Б. Р. Левина. – М. : Связь, 1976. – 496 с.

References

1. Kalman R. E. Novye rezultaty v lyneinoi fyltratsyy y teoryy predskazanyia / R. E. Kalman, R. S. Biusy // Tekhnycheskaia mekhanyka. – 1961. – Ser. D. – 83 s.
2. Volovyk A. Yu. Otsiniuvannia kharakterystyk funktsionalnoi nadiinosti fazovoho kanalu synkhronizatsii v systemi posadky santymetrovoho diapazonu / A. Yu. Volovyk, Yu. M. Volovyk // Herald of Khmelnytsky National University. Tekhnichni nauky. – 2007. – # 1. – S. 151–154.
3. Agee W. S. The WSM1R Best Estimate of Trajectory – An Overview / W. S. Agee, R. H. Turner // Analysis and Computation Division, White Sands Missile Range, New Mexico, Internal Memorandum. – No. 129. – January 1972. – 44 p.
4. Hsieh C. S. General two-stage Kalman filters / C. S. Hsieh. And F. C. Chen // IEEE Transactions on Automatic Control, 45, 4 (2000), P. 819–824.
5. Friedland B. Treatment of bias in recursive filtering / B. Friedland // IEEE Trans. Autom. Contr. – 1969. Vol. AC. 14. – # 4. – P. 359–367.
6. Seidzh E. Teoryia otsenyvanyia y ee prymenenye v sviazy y upravlenyy / E. Seidzh, Dzh. Mels / per. s anhl. pod red. B. R. Levyna. – M. : Sviaz, 1976. – 496 s.

Рецензія/Peer review : 15.06.2017 р. Надрукована/Printed :03.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Осадчук В.С.

УДК 004.93

Н.С. СВИРНЕВСКИЙ
Хмельницкий национальный университет

РАЗРАБОТКА WEB-СИСТЕМЫ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ WEBGL ТЕХНОЛОГИИ

В статье описывается архитектура программы для решения задач, связанных с аффинными преобразованиями пространства на основе WebGL – технологии, которая обеспечивает 3D-графику в браузере. Три кита лежат в основе WebGL технологии – HTML, JavaScript и OpenGL. Посредством языка шейдеров OpenGL реализуется обработка каждой вершины и нахождения её координат с учетом матриц модели и проекции, причем непосредственно на GPU (Graphic Processor Unit). GPU принимает на вход описание трехмерной сцены в виде массивов вершин и треугольников, а также параметры наблюдателя и по ним строится на экране двумерное изображение сцены для этого наблюдателя. На примере задачи сканирования рупорной антенны продемонстрирована эффективность для архитектуры WebGL приложения использования матрицы композиции аффинных преобразований, определяемой через последовательность перемножения матриц элементарных преобразований.

Ключевые слова: WebGL, 3D-графика, композиция, матрица, аффинные преобразования, антенна.

N.S. SVIRNEVSKYI
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT OF WEB-SYSTEM OF AFFINE TRANSFORMATIONS OF SPACE BASED ON WEBGL TECHNOLOGY

This article describes the architecture of the program for solving problems related to affine transformations of space based on WebGL - a technology that provides 3D graphics in the browser. Three whales are the basis of WebGL technology - HTML, JavaScript and OpenGL. Using the OpenGL shader language, each vertex is processed and its coordinates are taken into account, taking into account the model and projection matrices, and directly to the GPU (Graphic Processor Unit). GPU takes on the input a description of a three-dimensional scene in the form of arrays of vertices and triangles, as well as the parameters of the observer and a two-dimensional image of the scene for this observer is constructed on the screen. The example of the problem of scanning antenna demonstrates the efficiency for the WebGL application of using the composition matrix of affine transformations, determined through the sequence of multiplication of matrices of elementary transformations.

Keywords: WebGL, 3D-graphics, composition, matrix, affine transformations, antenna.

Введение

WebGL (Web-based Graphics Library) – технология, которая обеспечивает 3D-графику в браузере. Три кита лежат в основе WebGL технологии – HTML, JavaScript и OpenGL ES 2.0.

Анализ исследований и публикаций

В предыдущих публикациях [1–3] 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)[1] и обратная – восстановление параметров рупорной антенны по одному ее изображению [2] и реконструкция трехмерной модели по 2-м изображениям [3]. Эти задачи реализованы на платформе шаблона C++WinAPI приложения. Реализация механизма аффинных преобразований для других платформ, включая приложения для WEB, имеет ряд специфических особенностей, что требует рассматривать подобные задачи по новому, учитывая эти особенности.

Формулирование цели

Разработать архитектуру приложения для WEB с использованием механизма аффинных преобразований пространства на основе WebGL технологии.

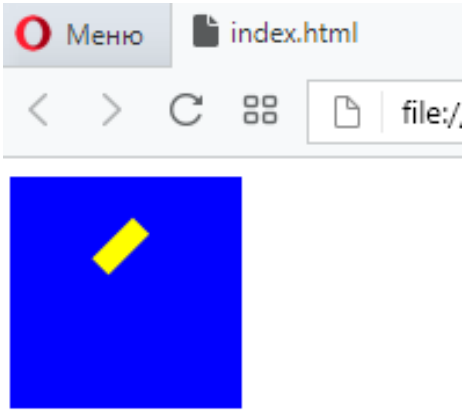


Рис. 1. Рисунок прямоугольника в Web-браузере

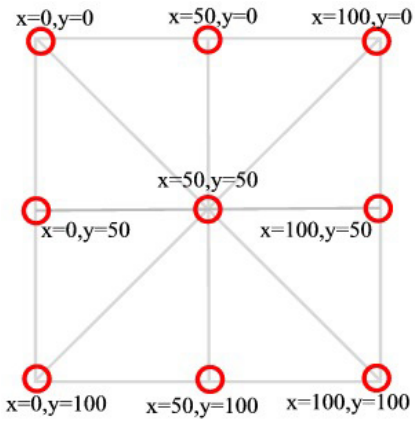


Рис. 2. Схема координатного пространства элемента canvas

Изложение основного материала

Вводная часть. Изложение теории будет идти параллельно с практической реализацией с переходом от простых примеров создания изображений на плоскости к более сложным примерам с 3D-графикой. Ниже приведен простейший код приложения, который обеспечивает 2D-преобразования и рисование прямоугольника в Web-браузере (рис. 1).

Файл index.html

```
<html>
     <head>
         <script src="draw.js" type="text/javascript"> </script>
     </head>
     <body onload="draw_b();">
  <canvas  id="b"  width="100" height="100" >  </canvas>
     </body>
 </html>
```

Файл draw.js

```
function draw_b() {
  var b_canvas = document.getElementById("b");
  var b_context = b_canvas.getContext("2d");
  b_context.fillStyle = "#0000FF";
  b_context.fillRect(0, 0, b_canvas.width, b_canvas.height);
  b_context.fillStyle = "#FFFF00";
  //b_context.rotate(-Math.PI/4);
  //b_context.translate(30,10);
  b_context.setTransform(0.707, -0.707, 0.707, 0.707, 0, 0);
  b_context.fillRect(0, 50, 25, 10);
}
```

В файле index.html на языке HTML определен элемент canvas – растровый холст на Web странице (прямоугольная двумерная сетка). Измерения пространственной области элемента canvas по ширине и высоте задаются в пикселах (рис.2). Верхний левый угол области Canvas имеет координаты x=0, y=0.

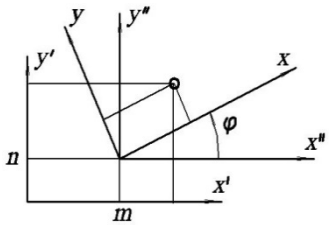
В файле draw.js на языке JavaScript получаем доступ по атрибуту id к элементу canvas и затем к объекту context, где определены методы преобразования пространства и свойства рисования. Метод setTransform (a, b, d, e, c, f) обеспечивает поворот плоскости элемента canvas на угол 45 градусов. Вызов метода fillRect() рисует прямоугольник и заполняет его текущим цветом заливки. Прямоугольник задается левым верхним углом (0, 50), шириной (25) и высотой (10) в направлении слева направо и сверху вниз.

Матричные преобразования

Многие веб-разработчики игнорируют матрицу аффинных преобразований, полагая её слишком сложной для понимания и используя взамен простейшие функции для трансформации типа rotate и translate (в коде они закомментированы). И совершенно зря, матрица преобразований обладает широкими возможностями, вдобавок, в том или ином виде поддерживаются всеми браузерами, а значит, её применение даёт кроссбраузерный код. Сама матрица имеет размер 3x3 и в общем виде записывается так:

$$\begin{pmatrix} a & d & 0 \\ b & e & 0 \\ c & f & 1 \end{pmatrix}$$

Роль каждого коэффициента матрицы становится понятна из следующего. Рассмотрим схему и уравнения для пересчета координат точки в новой СК [4].



$$\begin{cases} x' = x'' + m = x\cos\varphi + y\sin\varphi + m \\ y' = y'' + n = x\cos\varphi + y\sin\varphi + n \end{cases}$$

Рис. 3. Пересчет координат точки в новой СК

В матричном представлении уравнения запишутся так:

$$(x'\ y') = (x\ y)\begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} + (m\ n)$$

Обобщим формулы преобразований движения к формулам аффинного преобразования плоскости:

$$(x'\ y') = (x\ y)\begin{pmatrix} a & d \\ b & e \end{pmatrix} + (c\ f)$$

Не так уж часто мы выполняем только одно элементарное преобразование; обычно в приложении

требуется, чтобы мы создали сложное преобразование из нескольких элементарных. Например, нам может понадобиться переместить объект на вектор (3,-4), затем повернуть на 30°, затем масштабировать с помощью множителя (2,-1). Основное преимущество объединенных преобразований состоит в том, что к точке более эффективно применять одно результирующее преобразование, чем ряд преобразований друг за другом. В случае последовательного выполнения любой комбинации операций вращения и масштабирования и отражения результат легко можно записать в виде произведения матриц соответствующих преобразований. Очевидно, что удобнее применять результирующую матрицу (композицию матриц) вместо того, чтобы каждый раз заново вычислять произведение матриц. Однако таким способом нельзя получить результирующую матрицу преобразования, если среди последовательности преобразований присутствует хотя бы один сдвиг (перенос), поскольку операция переноса реализуется отдельно (с помощью сложения). Было бы хорошо иметь математический аппарат, позволяющий включать в композиции преобразований и операцию переноса. Однородные координаты и есть этот математический аппарат. Теперь точки плоскости можно описывать трехэлементным вектором, а матрицы преобразования должны иметь размер 3×3:

$$\begin{aligned} x' &= ax+by+c \\ y' &= dx+ey+f \\ 1' &= 0x+0y+1 \end{aligned}; \qquad (x'\ y'\ 1)=(x\ y\ 1)\begin{pmatrix} a & d & 0 \\ b & e & 0 \\ c & f & 1 \end{pmatrix}$$

Преимущество такого подхода (матричных формул) заключается в том, что совмещение последовательных элементарных преобразований при этом значительно упрощается. Например, два и более поворота можно записать в виде одной матрицы суммарного поворота:

$$R(\alpha)R(\beta)=\begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \cos(\alpha+\beta) & \sin(\alpha+\beta) & 0 \\ -\sin(\alpha+\beta) & \cos(\alpha+\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Результирующая матрица, полученная произведением двух исходных матриц преобразования, представляет собой совмещение элементарных преобразований. Независимо от количества элементарных преобразований в последовательности, можно всегда произвести совмещение так, чтобы только одна матрица 3×3 представляла всю последовательность преобразований.

Еще больший эффект использования матрицы аффинных преобразований можно получить взамен простейших функций для трансформации при создании 3D-графики на Web-странице. Переход из одной прямолинейной координатной системы к другой описывается в общем случае системой уравнений с соответствующим матричным представлением:

$$\begin{aligned} x^* &= \alpha_1 x+\alpha_2 y+\alpha_3 z+\lambda \\ y^* &= \beta_1 x+\beta_2 y+\beta_3 z+\mu \\ z^* &= \gamma_1 x+\gamma_2 y+\gamma_3 z+\nu \end{aligned}; \qquad (x^*\ y^*\ z^*\ 1)=(x\ y\ z\ 1)A$$

$$A=\begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 0 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 0 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 0 \\ \lambda & \mu & \nu & 1 \end{pmatrix}$$

Архитектура WebGL приложения

Графические приложения наиболее нуждаются оптимизации, особенно в Web программировании. Изучая каждую функцию OpenGL, стоит задуматься, как вызов этой функции выполняется и сколько времени он может занять. Возможности OpenGL определяются аппаратурой, которая, как известно, имеет тенденцию развиваться. В соответствии с этим в OpenGL добавляются новые функции. К примеру, с появлением GPU (Graphic Processor Unit) весь функционал с последовательной передачей и обработкой каждой вершины примитива практически перестал использоваться. Взамен GPU принимали на вход описание трехмерной сцены в виде массивов вершин и треугольников, а также параметры наблюдателя, и строили по ним на экране двумерное изображение сцены для этого наблюдателя. По мере совершенствования GPU появилась возможность хранить вершины и их атрибуты в различных буферах – непосредственно на GPU.

Последними тенденциями в графической аппаратуре является замена фиксированной функциональности конвейера обработки функций OpenGL программируемостью в тех областях, которые стали слишком сложны. В OpenGL в версии 2.0 добавляется поддержка высокоуровневого шейдерного языка GLSL (OpenGL Shading Language – GLSL). Посредством языка шейдеров OpenGL фиксированная функциональность этапов обработки вершин и фрагментов в конвейере OpenGL заменяется программируемостью, которая позволяет выполнять все, что может фиксированная функциональность и даже намного больше.

Шейдерные программы пишутся на специально разработанных языках, одним из которых является язык GLSL(OpenGL Shading Language), который полностью стал частью OpenGL, начиная с версии 2.0. Синтаксис GLSL основан на языках программирования семейства C. Он включает почти все

распространенные в C/C++ арифметические, логические и битовые операторы, конструкторы для инициализации и прочее.

Программа обычно состоит из двух шейдеров: одного вершинного и одного фрагментного. Может присутствовать и более одного шейдера каждого типа, но должна быть только одна функция main() среди всех фрагментных шейдеров и одна – среди всех вершинных. Обычно самый простой путь заключается в создании одного шейдера каждого типа.

Вершинные шейдеры предназначены для обработки каждой вершины и нахождения её координат с учетом матриц модели и проекций, а также прочих, зависящих от задумки программиста, условий. Для этого вершинный шейдер получает все параметры вершины (координаты, цвет, текстурные координаты и т.д.). Также основная программа может передать шейдеру любые другие, определяемые программистом параметры, включая совершенно произвольные, имеющие смысл только для выполнения общей задачи. Например, шейдеру может быть передан параметр «сила ветра», который совершенно не привязан ни к какому способу представления трехмерных объектов, ни к какому графическому API. Это просто параметр, который будет обрабатываться внутри шейдера.

Пиксельные шейдеры имеют своей целью расчет цвета каждого пикселя и значения глубины (обычно, глубину рассчитывать необязательно) или вынесение решения о том, что пиксель выводит не надо. Пиксельный шейдер может получать на вход текстурные координаты, соответствующие обрабатываемой точке, примешиваемый цвет и, возможно, некоторые другие параметры. На основании этих данных он рассчитывает цвет точки и завершает работу. Пиксельный шейдер вызывается при обработке каждой двумерной точки. Необходимо четко понимать, что шейдеры работают раздельно друг от друга, ими можно подменить не все части рендеринга и это накладывает значительные ограничения на возможные в реализации шейдерами алгоритмы.

Шейдеры взаимодействуют с фиксированной частью конвейера OpenGL, записывая значения во встроенные переменные OpenGL, которые имеют префикс "gl_". Вершинный шейдер ответственен как минимум за одну переменную: gl_Position, и обычно трансформирует вершину в матрицах проекции и моделей. Обязательной работой для фрагментного шейдера является запись цвета фрагмента, в встроенную переменную gl_FragColor. Вершинный шейдер выполняется один раз для каждой вершины, а фрагментный – один раз для каждого фрагмента. Несколько исполнений одного и того же шейдера могут проходить параллельно.

В каждый момент выполнения программы активна лишь одна пара, состоящая из вершинного и пиксельного шейдера. В случае, если программист не установил активной пару шейдеров, работает стандартный шейдер, который обеспечивает всю стандартную функциональность (конвейер) графической библиотеки OpenGL. Обычно пару вершинного и фрагментного шейдеров называют просто шейдером.

Для создания WebGL-приложения на базе WebGL API необходимо:

1. Создать на HTML5 элемент canvas.
2. Получить контекст элемента canvas.
3. Инициализировать рабочую область отображения графики.
4. Инициализировать шейдер с параметрами.
5. Создать буфер данных вершин модели.
6. Создать матрицу преобразования вершин модели на экран.
7. Нарисовать графику.

Ниже приведен простейший код WebGL приложения, который обеспечивает рисование 2-х прямоугольников – белого на фоне черного.

Файл index.html

```
<html>
     <head>
         <script src="draw.js" type="text/javascript"> </script>
     </head>
     <body onload="onLoad();">
         <canvas id="webgl"  width="500" height="500"></canvas>
     </body>
</html>
```

Файл draw.js

```
function onLoad() {
              var canvas = document.getElementById("webgl");
              var gl = initWebGL(canvas);
              initViewport(gl, canvas);
              initShader(gl);
              initMatrices();
              var model = createModel(gl);
              draw(gl, model);
             }

function initWebGL(canvas) {
    gl = canvas.getContext("webgl") || canvas.getContext("experimental-webgl");
        return gl;
    }
```

```
function initViewport(gl, canvas) {
            gl.viewport(0, 0, canvas.width, canvas.height);
            }

var    shaderProgram,    shaderVertexPositionAttribute,    shaderProjectionMatrixUniform,
shaderModelViewMatrixUniform;
function initShader(gl) {
  var fragmentShader = createShader(gl, fragmentShaderSource, "fragment");
  var vertexShader = createShader(gl, vertexShaderSource, "vertex");
  shaderProgram = gl.createProgram();
  gl.attachShader(shaderProgram, vertexShader);
  gl.attachShader(shaderProgram, fragmentShader);
  gl.linkProgram(shaderProgram);
  shaderVertexPositionAttribute = gl.getAttribLocation(shaderProgram, "vertexPos");
  gl.enableVertexAttribArray(shaderVertexPositionAttribute);
  shaderProjectionMatrixUniform = gl.getUniformLocation(shaderProgram, "projectionMatrix");
  shaderModelViewMatrixUniform = gl.getUniformLocation(shaderProgram, "modelViewMatrix");
  if (!gl.getProgramParameter(shaderProgram, gl.LINK_STATUS)) {
      alert("Could not initialise shaders");
    }
}

function createShader(gl, str, type) {
   var shader;
   if (type == "fragment") {
       shader = gl.createShader(gl.FRAGMENT_SHADER);
       }
       else if (type == "vertex") {
          shader = gl.createShader(gl.VERTEX_SHADER);
       } else {
          return null;
          }
    gl.shaderSource(shader, str);
    gl.compileShader(shader);
       if (!gl.getShaderParameter(shader, gl.COMPILE_STATUS)) {
         alert(gl.getShaderInfoLog(shader));
         return null;
       }
   return shader;
}

function initMatrices()
{
   modelViewMatrix = new Float32Array(
     [1, 0, 0, 0,
      0, 1, 0, 0,
      0, 0, 1, 0,
      0, 0, -5, 1]);
   projectionMatrix = new Float32Array(
[1, 0, 0, 0,
      0, 1, 0, 0,
      0, 0, 0, 0,
      0, 0, 0, 1]);
}

function createModel(gl) {
       var vertexBuffer;
       vertexBuffer = gl.createBuffer();
       gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, vertexBuffer);
       var verts = [
                    .5, .5, 0.0,
                    -.5, .5, 0.0,
                    .5, -.5, 0.0,
                    -.5, -.5, 0.0
                    ];
       gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(verts), gl.STATIC_DRAW);
       var square = {buffer:vertexBuffer, vertSize:3, nVerts:4, primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
       return square;
    }

function draw(gl, obj) {
   gl.clearColor(0.0, 0.0, 0.0, 1.0);
   gl.clear(gl.COLOR_BUFFER_BIT);
   gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, obj.buffer);
   gl.useProgram(shaderProgram);
 gl.vertexAttribPointer(shaderVertexPositionAttribute, obj.vertSize, gl.FLOAT, false, 0, 0);
   gl.uniformMatrix4fv(shaderProjectionMatrixUniform,false, projectionMatrix);
   gl.uniformMatrix4fv(shaderModelViewMatrixUniform,false, modelViewMatrix);
   gl.drawArrays(obj.primtype, 0, obj.nVerts);
}
```

```
var vertexShaderSource =
" attribute vec3 vertexPos;\n" +
" uniform mat4 modelViewMatrix;\n" +
" uniform mat4 projectionMatrix;\n" +
" void main(void) {\n" +
"gl_Position = projectionMatrix * modelViewMatrix * vec4(vertexPos, 1.0);\n" +
" }\n";

var fragmentShaderSource =
" void main(void) {\n" +
" gl_FragColor = vec4(1.0, 1.0, 1.0, 1.0);\n" +
"}\n";
```

WebGL приложение управления положением рупорной антенны

Ниже рассмотрена техника использования матрицы аффинных преобразований при создании 3D-графики на Web-странице (рис.4) на примере выполнения геометрических преобразований рупорной антенны через управление изменением любого из 5 параметров ее положения (рис. 5) перемещением мышки (событие "mousemove"). В программе, описанной ниже, при перемещении мышки меняются 2 угла – альфа и бета.

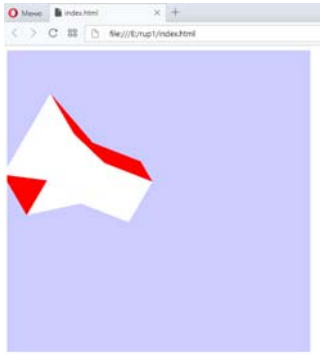


Рис. 4. Пример реализации 3D-графики на Web-странице

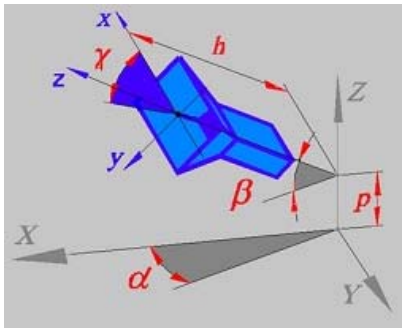


Рис. 5. Параметры положения рупорной антенны

Через OpenGL предоставляется возможность описать модель в глобальной системе координат XYZ. Результирующая матрица преобразований (рис. 6) от начального положения антенны, при котором СК антенны совпадает с положением глобальной СК (рис. 7), до ее конечного положения в пространстве (см. рис. 5) определяется через последовательность перемножения матриц элементарных преобразований (табл. 1).

$$T_p = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_0$$

$$T_p = \begin{pmatrix} \cos\chi\cos\alpha + \sin\chi\sin\beta\sin\alpha & \sin\chi\cos\beta & 0 & 0 \\ -\sin\chi\cos\alpha + \cos\alpha\sin\beta\sin\alpha & \cos\chi\cos\beta & 0 & 0 \\ \cos\beta\sin\alpha & -\sin\beta & 0 & 0 \\ h\cos\beta\sin\alpha & -h\sin\beta + p & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Рис. 6. Результирующая матрица преобразований антенны

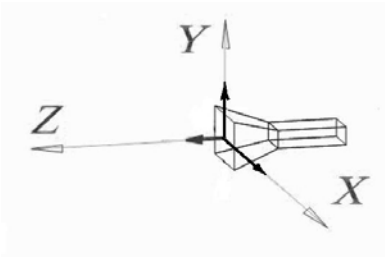


Рис. 7. Начальное положение антенны

Таблица 1

Матрицы элементарных преобразований антенны

1	2
Сдвиг на вдоль оси Z	Поворот вокруг оси Z
$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & h & 1 \end{pmatrix}$	$T_2 = \begin{pmatrix} \cos\chi & \sin\chi & 0 & 0 \\ -\sin\chi & \cos\chi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Продовження табл. '

1	2
Поворот вокруг оси X	Поворот вокруг оси Y
$T_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$T_4 = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Сдвиг вдоль оси Y	Проекция в направлении оси Z
$T_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & p & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$T_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Ниже приведен код WebGL приложения, который обеспечивает визуализацию управления положением рупорной антенны (рис.8).

Файл index.html

```
< <html>
     <head>
         <script src="draw.js" type="text/javascript"> </script>
     </head>
     <body onload="onLoad();">
<canvas id="webgl"   width="500" height="500"></canvas>
<script id="fragmentShaderSource" type="x-shader/x-fragment">
precision mediump float;
varying vec4 vColor;
void main(void) {
gl_FragColor = vColor;
}
</script>
<script id="vertexShaderSource" type="x-shader/x-vertex">
attribute vec3 vertexPos;
attribute vec4 aVertexColor;
uniform mat4 modelViewMatrix;
uniform mat4 projectionMatrix;
varying vec4 vColor;
void main(void) {
gl_Position = projectionMatrix * modelViewMatrix * vec4(vertexPos, 1.0);
vColor = aVertexColor;
}
</script>
     </body>
 </html>
```

Файл draw.js

```
function onLoad() {
              var canvas = document.getElementById("webgl");
              var gl = initWebGL(canvas);
              initViewport(gl, canvas);
              initShader(gl);
              createModel(gl);
              drawScene();
              canvas.addEventListener("mousemove", mouseMoveEvent, false);
              canvas.addEventListener("mousedown", mouseDownEvent, false);
              canvas.addEventListener("mouseup",   mouseUpEvent, false);
             }
function initWebGL(canvas) {
    gl = canvas.getContext("webgl") || canvas.getContext("experimental-webgl");
        return gl;
    }
function initViewport(gl, canvas) {
            gl.viewport(0, 0, canvas.width, canvas.height);
            }
var     shaderProgram,     shaderVertexPositionAttribute,     shaderVertexColorAttribute,
shaderProjectionMatrixUniform, shaderModelViewMatrixUniform;
function initShader(gl) {
  var fragmentShader = createShader(gl, "fragmentShaderSource");
  var vertexShader = createShader(gl, "vertexShaderSource");
  shaderProgram = gl.createProgram();
  gl.attachShader(shaderProgram, vertexShader);
  gl.attachShader(shaderProgram, fragmentShader);
  gl.linkProgram(shaderProgram);
```

```
          shaderVertexPositionAttribute = gl.getAttribLocation(shaderProgram, "vertexPos");
          gl.enableVertexAttribArray(shaderVertexPositionAttribute);
        shaderVertexColorAttribute = gl.getAttribLocation(shaderProgram, "aVertexColor");
        gl.enableVertexAttribArray(shaderVertexColorAttribute);
          shaderProjectionMatrixUniform = gl.getUniformLocation(shaderProgram, "projectionMatrix");
          shaderModelViewMatrixUniform = gl.getUniformLocation(shaderProgram, "modelViewMatrix");
          if (!gl.getProgramParameter(shaderProgram, gl.LINK_STATUS)) {
              alert("Could not initialise shaders");
            }
        }
        function createShader(gl, id) {
        var shaderScript = document.getElementById(id);
        if (!shaderScript) {
        return null;
        }
        var str = "";
        var k = shaderScript.firstChild;
        while (k) {
        if (k.nodeType == 3)
        str += k.textContent;
        k = k.nextSibling;
        }
        var shader;
        if (shaderScript.type == "x-shader/x-fragment") {
        shader = gl.createShader(gl.FRAGMENT_SHADER);
        }
        else if (shaderScript.type == "x-shader/x-vertex") {
        shader = gl.createShader(gl.VERTEX_SHADER);
        }
        else {return null;}
        gl.shaderSource(shader, str);
        gl.compileShader(shader);
        if (!gl.getShaderParameter(shader, gl.COMPILE_STATUS)) {
        alert(gl.getShaderInfoLog(shader));
        return null;
        }
        return shader;
        }
        var rightface;
        var colorsrightface;
        var downface;
        var colorsdownface;
        var leftface;
        var colorsleftface;
        var upperface;
        var colorsupperface;
        function createModel(gl) {
               rightface = gl.createBuffer();
               gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, rightface);
               var vertices = [ 0.40, 0.20, 0.0,
                             0.40, -0.20, 0.0,
                            0.20 ,0.10, -0.40,
                            0.20, -0.10, -0.40,
                            0.20, 0.10, -0.80,
                            0.20, -0.10, -0.80
                            ];
               gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(vertices), gl.STATIC_DRAW);
              rightface = {buffer:rightface, vertSize:3, nVerts:6, primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
colorsrightface = gl.createBuffer();
                gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, colorsrightface);
                var colors = []
                for (var i=0; i < 6; i++) {
                  colors = colors.concat([1.0, 0.0, 0.0, 1.0]);
                }
                gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(colors), gl.STATIC_DRAW);
               colorsrightface      =      {buffer:colorsrightface,      vertSize:4,      nVerts:6,
primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
               var vertexBuffer2 = gl.createBuffer();
               gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, vertexBuffer2);
                var vertices = [-0.40,-0.20,0.0,
                              0.40,-0.20,0.0,
                             -0.20,-0.10,-0.40,
                             0.20,-0.10,-0.40,
                             -0.20,-0.10,-0.80,
                              0.20,-0.10,-0.80
                            ];
               gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(vertices), gl.STATIC_DRAW);
               downface        =        {buffer:vertexBuffer2,        vertSize:3,        nVerts:6,
primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
                colorsdownface = gl.createBuffer();
                gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, colorsdownface);
```

```
                var colors = []
                for (var i=0; i < 6; i++) {
                  colors = colors.concat([1.0, 1.0, 1.0, 1.0]);
                }
                gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(colors), gl.STATIC_DRAW);
                colorsdownface      =      {buffer:colorsdownface,      vertSize:4,      nVerts:6,
primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
               var vertexBuffer3 = gl.createBuffer();
               gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, vertexBuffer3);
               var vertices = [ -0.40, 0.20, 0.0,
                             -0.40, -0.20, 0.0,
                            -0.20 ,0.10, -0.40,
                            -0.20, -0.10, -0.40,
                            -0.20, 0.10, -0.80,
                            -0.20, -0.10, -0.80
                            ];
               gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(vertices), gl.STATIC_DRAW);
               leftface        =        {buffer:vertexBuffer3,        vertSize:3,        nVerts:6,
primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
                colorsleftface = gl.createBuffer();
                gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, colorsleftface);
                var colors = []
                for (var i=0; i < 6; i++) {
                  colors = colors.concat([1.0, 0.0, 0.0, 1.0]);
                }
                gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(colors), gl.STATIC_DRAW);
                colorsleftface      =      {buffer:colorsleftface,      vertSize:4,      nVerts:6,
primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
              var vertexBuffer4 = gl.createBuffer();
              gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, vertexBuffer4);
              var vertices = [-0.40,0.20,0.0,
                            0.40,0.20,0.0,
                           -0.20,0.10,-0.40,
                            0.20,0.10,-0.40,
                           -0.20,0.10,-0.80,
                            0.20,0.10,-0.80
                            ];
               gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(vertices), gl.STATIC_DRAW);
               upperface        =        {buffer:vertexBuffer4,        vertSize:3,        nVerts:6,
primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
               colorsupperface = gl.createBuffer();
                gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, colorsupperface);
                var colors = []
                for (var i=0; i < 6; i++) {
                  colors = colors.concat([1.0, 1.0, 1.0, 1.0]);
                }
                gl.bufferData(gl.ARRAY_BUFFER, new Float32Array(colors), gl.STATIC_DRAW);
                colorsupperface      =      {buffer:colorsupperface,      vertSize:4,      nVerts:6,
primtype:gl.TRIANGLE_STRIP};
            }
        function drawScene() {
           gl.clearColor(0.8, 0.8, 1.0, 1.0);
           gl.enable(gl.DEPTH_TEST);
           gl.clear(gl.COLOR_BUFFER_BIT | gl.DEPTH_BUFFER_BIT );
                      initMatrices();
                      draw(gl, rightface, colorsrightface);
                      draw(gl, downface, colorsdownface);
                      draw(gl, leftface, colorsleftface);
                      draw(gl, upperface, colorsupperface);
        }
        var A = 45.0;
        A = A * Math.PI / 180.0;
        var B = -45.0;
        B = B * Math.PI / 180.0;
        var C = 45.0;
        C = C * Math.PI / 180.0;
        var h = 1.0;
        var p = 0.0;
        var lastX = 0 , lastY = 0;
        var mouseState=false;
        function initMatrices()
        {
           modelViewMatrix = new Float32Array(
             [Math.cos(C)*Math.cos(A),  Math.sin(C)*Math.cos(B), -Math.sin(A)*Math.cos(C), 0,
              -Math.sin(C)*Math.cos(A), Math.cos(C)*Math.cos(B), Math.sin(C)*Math.sin(A), 0,
              Math.cos(B)*Math.sin(A),      -Math.sin(B),        Math.cos(B)*Math.cos(A), 0,
              h*Math.cos(B)*Math.sin(A), -h*Math.sin(B)+p,    h*Math.cos(B)*Math.cos(A), 1]);
           projectionMatrix = new Float32Array(
             [1, 0, 0, 0,
              0, 1, 0, 0,
              0, 0, 0, 0,
```

```
        0, 0, 0, 1]);
}
function draw(gl, obj, colobj) {
 gl.useProgram(shaderProgram);
 gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, obj.buffer);
 gl.vertexAttribPointer(shaderVertexPositionAttribute, obj.vertSize, gl.FLOAT, false, 0, 0);
 gl.bindBuffer(gl.ARRAY_BUFFER, colobj.buffer);
 gl.vertexAttribPointer(shaderVertexColorAttribute, colobj.vertSize, gl.FLOAT, false, 0, 0);
 gl.uniformMatrix4fv(shaderProjectionMatrixUniform,false, projectionMatrix);
 gl.uniformMatrix4fv(shaderModelViewMatrixUniform,false, modelViewMatrix);
 gl.drawArrays(obj.primtype, 0, obj.nVerts);
}
function mouseMoveEvent(e) {
        if (mouseState==true) {
           A-=(lastX-e.pageX)*0.01;
           B-=(lastY-e.pageY)*0.01;
        lastX = e.pageX;
        lastY = e.pageY;
    drawScene();
    }
}
function mouseDownEvent(e) {
        mouseState = true;
        lastX = e.pageX;
        lastY = e.pageY;
}
function mouseUpEvent(e) {
        mouseState = false;
}
```

Выводы

Разработана архитектура программы для решения задач, связанных с аффинными преобразованиями пространства на основе WebGL технологии. На примере задачи сканирования рупорной антенны продемонстрирована эффективность использования матрицы аффинных преобразований, определяемой через последовательность перемножения матриц элементарных преобразований.

Литература

1. Свирневский Н.С. Разработка архитектуры программы для решения задач, связанных с аффинными преобразованиями пространства / Н. С. Свирневский // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 176–185.
2. Свирневский Н.С. Восстановление параметров пространственного объекта по изображению / Н.С. Свирневский // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 6. – С. 74–78.
3. Свирневский Н.С. Алгоритм реконструкции трехмерной модели по изображениям / Н. С. Свирневский // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 2. – С. 212–218.
4. Свирневский Н.С. Основы разработки графических приложений / Н.С. Свирневский, С.С. Ковальчук. – Хмельницкий : ХНУ, 2015. – 270 с.

References

1. Svyrnevskyi N.S. Razrabotka arkhytektury prohrammy dlia reshenyia zadach, sviazannikh s affynnimy preobrazovanyiamy prostranstva [Tekst] / N. S. Svyrnevskyi // Herald of Khmelnytsky National University. – 2017. – № 3. – S. 176-185.
2. Svyrnevskyi N.S. Vosstanovlenye parametrov prostranstvennoho obiekta po yzobrazhenyiu [Tekst] / N.S. Svyrnevskyi // Herald of Khmelnytsky National University. – 2011. – № 6. – S. 74–78.
3. Svyrnevskyi N.S. Alhorytm rekonstruktsyy trekhmernoi modely po yzobrazhenyiam [Tekst] / N. S. Svyrnevskyi // Herald of Khmelnytsky National University. – 2017. – № 2. – S. 212-218.
4. Svyrnevskyi N.S. Osnovy razrabotky hrafycheskykh prylozhenyi / N.S. Svyrnevskyi, S.S. Kovalchuk. – Khmelnytskyi: KhNU, 2015. – 270 s.

Рецензія/Peer review : 07.08.2017 р. Надрукована/Printed :05.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатый Р.В.

УДК 004.056.55

І.О. РОЗЛОМІЙ, Г.В. КОСЕНЮК
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ ДОКУМЕНТІВ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙ МАТРИЧНОГО КРИПТОГРАФІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

В сучасному середовищі документована інформація, представлена в цифровій формі, має велике значення, рівно як і проблема її захисту від підробки, неконтрольованого поширення, знищення. Багато методів розроблено для захисту інформації, проте жоден з них не гарантує повної ефективності. Відсутність надійних засобів захисту електронних документів є основою для пошуку нових рішень, серед яких є комп'ютерна стеганографія. Стаття присвячена розгляду системи накладання цифрового водяного знаку. В статті запропонований спосіб формування цифрового водяного знаку для електронних документів, який ґрунтується на операціях матричного криптографічного перетворення. Використання розробленого алгоритму забезпечить достовірність електронного документу. Також даний алгоритм може бути використаний в комплексному методі захисту електронних документів разом з електронним цифровим підписом.

Ключові слова: електронний документ, стеганографія, цифровий водяний знак, інверсія бітів, матричні перетворення.

I.O. ROZLOMII, G.V. KOSENYUK
Cherkassy Bogdan Khmelnytsky National University

METHOD OF FORMING A DIGITAL WATERMARK FOR ELECTRONIC DOCUMENTS BASED ON OPERATIONS OF MATRIX CRYPTOGRAPHIC TRANSFORMATION

In a modern environment the documented information is presented in a digital form matters very much exactly, as well as problem of her protecting from an imitation, out-of-control distribution, elimination. Many methods are worked out for protection of information, however none of them guarantees complete efficiency. Absence of reliable facilities of defence of electronic documents is basis for the search of new decisions among that there is computer steganography. The article is sanctified to consideration of the system of imposition of digital watermark. In the article the offered method of forming of digital watermark for electronic documents based on operations of matrix cryptographic transformation. The use of the worked out algorithm will provide authenticity of electronic document. Also this algorithm can be used in the complex method of defence of electronic documents together with electronic digital signature.

Keywords: electronic document, steganography, digital watermark, inversion of bits, matrix transformation.

Вступ. Одним з напрямків захисту електронних документів, при збереженні, передачі комп'ютерною мережею є цифрова стеганографія [1]. Стеганографія в інформаційних системах зв'язку недостатньо розвинений напрямок, а існуючі методи мало пристосовані до завдань захисту електронних документів. Це пов'язано з властивими їй такими недоліками, як невисока надійність і стійкість. Проте, разом з цим, застосування стеганографічних систем в області електронного документообігу дозволить вирішити ряд важливих завдань. Серед яких варто відмітити забезпечення прихованого збереження і передачі електронного документу, зробити непомітними комунікації між відправником та отримувачем повідомлень, виявлення каналів витоку ЕД, а також внесення прихованого електронного цифрового підпису [2, 3]. Однак, в деяких випадках використання цифрового підпису для забезпечення інформаційної безпеки документів є недостатнім. Для підвищення надійності захисту ЕД від можливих порушень цілісності доречно вжити додаткового рівня захисту, наприклад, використанням засобів стеганографії.

Одним з механізмів стеганографії є цифровий водяний знак (ЦВЗ) [4]. Вбудовування в електронний документ невидимих міток, в якості яких можуть виступати послідовності символів чи графічні зображення є одним з розповсюджених способів захисту документів від підробки. Широке впровадження ЦВЗ для захисту авторських прав ЕД призводить до необхідності розробки методів побудови ЦВЗ, більш стійких до різного роду атак. Інформація, яку містять ЕД вразлива до неправомірних модифікацій: редагування, видалення фрагментів ЕД. Тому, розробка алгоритму побудови ЦВЗ для електронних документів є актуальною задачею.

Постановка проблеми. До цього відомі методи вбудовування ЦВЗ не можуть в повній мірі вирішити завдання захисту ЕД від фальсифікацій. Більшість розроблених на сьогодні методів побудови ЦВЗ, які можуть бути використані для задач захисту документів побудовані на основі методу LSB. Проте, для більшості з них характерна вразливість, низька стеганографічна стійкість. Враховуючи недоліки попередніх методів вбудовування ЦВЗ, можна запропонувати алгоритм побудови ЦВЗ, який базується на операціях матричного криптографічного перетворення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Пошуком ефективних стеганографічних методів захисту інформації займалася велика кількість вчених, серед яких можна виділити: Д.В. Очнев, Е.С. Чиркін, Ю.А. Белобокова, А.В. Балакін, А.С. Єлисеєв, В.М. Зажома та інші. Щодо питань забезпечення достовірності електронних документів варто відмітити працю Д.А. Сагайдака та Р.Т. Файзуліна, в якій висунуто спосіб формування цифрового водяного знаку для фізичних та електронних документів [5]. Проте, ще залишаються питання, які потребують подальшого доопрацювання та вивчення.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є розробка алгоритму побудови цифрового водяного знаку на основі використання операцій матричного криптографічного перетворення.

Виклад основного матеріалу. Зазвичай, в документованій інформації з метою захисту авторських прав використовуються цифрові водяні знаки – цифрові мітки, які впроваджуються в електронний документ за допомогою спеціальних стеганографічних перетворень [6]. Для побудови системи ЦВЗ до цього часу не використовувалися операції матричного криптографічного перетворення. Алгоритм накладання цифрового водяного знаку з використанням матричних перетворень можна описати такими кроками:

1) спочатку необхідно визначити проміжок числових значень, над якими буде здійснюватися матричне криптографічне перетворення;
2) ввести матрицю, на основі якої здійснюватиметься перетворення значень з проміжку;
3) визначити параметр інверсії;
4) обчислити результат матричного криптографічного перетворення вказаного числового значення;
5) на основі отриманого результату визначити байти інформації, в яких будуть інвертуватися біти;
6) збільшити значення лічильника, перейти до наступного значення з числового проміжку;
7) повторювати матричне криптографічне перетворення значень до кінця заданого числового проміжку;
8) цифровий водяний знак вбудований в ЕД.

Процес вбудовування цифрового водяного знаку в електронний документ може бути описаний наступним алгоритмом, рис. 1.

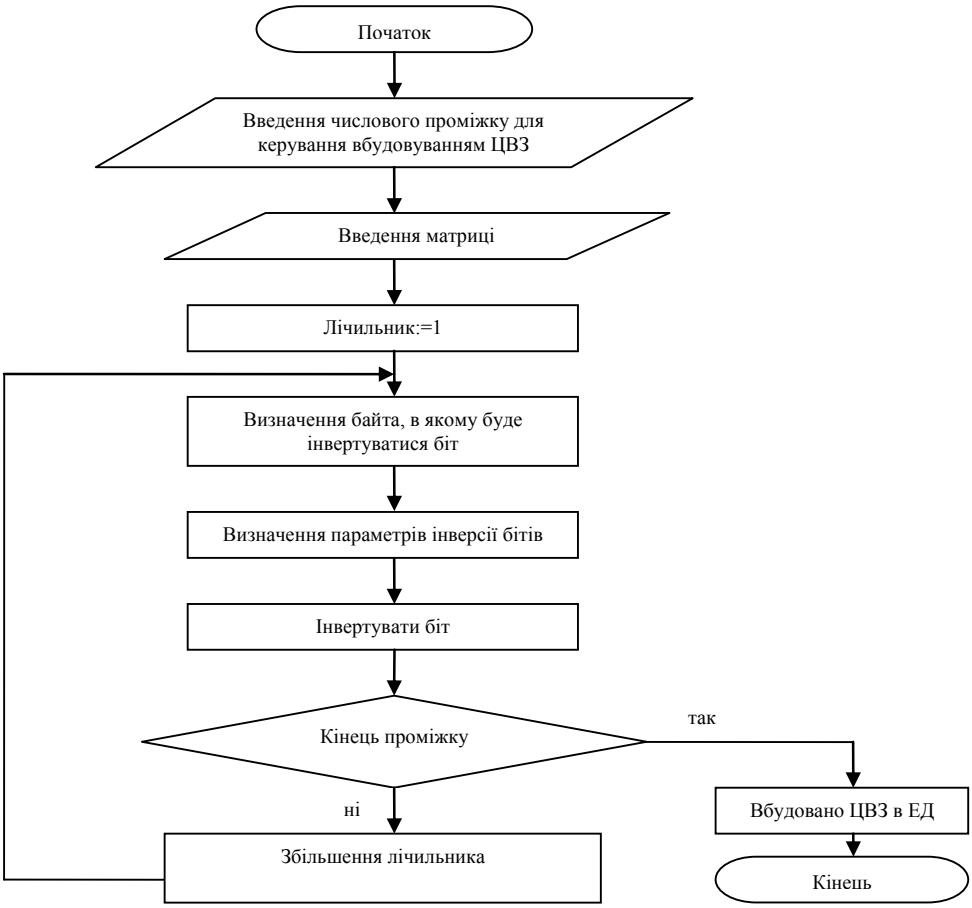


Рис. 1. Алгоритм накладання цифрового водяного знаку на електронний документ на основі матричних криптографічних перетворень

Розглянемо приклад матричного перетворення числових значень з заданого проміжку.

Нехай, заданий числовий проміжок від 15 до 19. Спочатку матричне криптографічне перетворення здійснюється над числом 15. Якщо операція матричного криптографічного прямого перетворення задана матрицею $\vec{F}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$, для знаходження результату перетворення паролю, наприклад,

$15_{dec} = 00001111_{bin}$ необхідно підставити значення відповідних інформаційних бітів в систему рівнянь

$$F = \begin{cases} x_1 \oplus x_6 \oplus x_8 = y_1 \\ x_3 \oplus x_7 = y_2 \\ x_4 \oplus x_6 = y_3 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_7 = y_4 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_8 = y_5 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 = y_6 \\ x_2 \oplus x_5 \oplus x_8 = y_7 \\ x_4 \oplus x_5 \oplus x_7 = y_8 \end{cases},$$

де $x_1,...,x_8$ – вихідний байт, $y_1,...,y_8$ – байт, отриманий в результаті матричного перетворення.

Підставивши відповідні значення отримаємо: $$F = \begin{cases} x_1 \oplus x_6 \oplus x_8 \\ x_3 \oplus x_7 \\ x_4 \oplus x_6 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_7 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_8 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 \\ x_2 \oplus x_5 \oplus x_8 \\ x_4 \oplus x_5 \oplus x_7 \end{cases} = \begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = 1 \\ y_3 = 1 \\ y_4 = 1 \\ y_5 = 1 \\ y_6 = 0 \\ y_7 = 0 \\ y_8 = 0 \end{cases}.$$

Відповідно результатом перетворення буде значення $01111000_{bin} = 120_{dec}$. Аналогічним способом виконаємо матричні перетворення над кожним значенням з заданого проміжку, як показано в табл. 1.

Таблиця 1

Обчислення порядкових номерів байтів ЕД, де будуть інвертуватися біти

Операція матричного криптографічного перетворення значень 16-19	
$16_{dec} = 00010000_{bin}$ $F = \begin{cases} x_1 \oplus x_6 \oplus x_8 \\ x_3 \oplus x_7 \\ x_4 \oplus x_6 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_7 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_8 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 \\ x_2 \oplus x_5 \oplus x_8 \\ x_4 \oplus x_5 \oplus x_7 \end{cases} = \begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = 0 \\ y_3 = 1 \\ y_4 = 0 \\ y_5 = 0 \\ y_6 = 1 \\ y_7 = 0 \\ y_8 = 1 \end{cases}$ Результат: $00100101_{bin} = 37_{dec}$	$17_{dec} = 00010001_{bin}$ $F = \begin{cases} x_1 \oplus x_6 \oplus x_8 \\ x_3 \oplus x_7 \\ x_4 \oplus x_6 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_7 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_8 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 \\ x_2 \oplus x_5 \oplus x_8 \\ x_4 \oplus x_5 \oplus x_7 \end{cases} = \begin{cases} y_1 = 1 \\ y_2 = 0 \\ y_3 = 1 \\ y_4 = 0 \\ y_5 = 1 \\ y_6 = 1 \\ y_7 = 1 \\ y_8 = 1 \end{cases}$ Результат: $10101111_{bin} = 175_{dec}$
$18_{dec} = 00010010_{bin}$ $F = \begin{cases} x_1 \oplus x_6 \oplus x_8 \\ x_3 \oplus x_7 \\ x_4 \oplus x_6 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_7 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_8 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 \\ x_2 \oplus x_5 \oplus x_8 \\ x_4 \oplus x_5 \oplus x_7 \end{cases} = \begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = 1 \\ y_3 = 1 \\ y_4 = 1 \\ y_5 = 0 \\ y_6 = 1 \\ y_7 = 0 \\ y_8 = 0 \end{cases}$ Результат: $01110100_{bin} = 116_{dec}$	$19_{dec} = 00010011_{bin}$ $F = \begin{cases} x_1 \oplus x_6 \oplus x_8 \\ x_3 \oplus x_7 \\ x_4 \oplus x_6 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_7 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus x_8 \\ x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 \\ x_2 \oplus x_5 \oplus x_8 \\ x_4 \oplus x_5 \oplus x_7 \end{cases} = \begin{cases} y_1 = 1 \\ y_2 = 1 \\ y_3 = 1 \\ y_4 = 1 \\ y_5 = 1 \\ y_6 = 1 \\ y_7 = 1 \\ y_8 = 0 \end{cases}$ Результат: $11111110_{bin} = 255_{dec}$

Отримані в результаті перетворення значення вкажуть на байт інформації електронного документа, в якому будуть інвертуватися біти. Згідно з обчисленнями, в байтах 37, 116, 120, 175, 254 будуть інвертуватися біти, рис. 2.

Електронний документ (байти інформації)										
1	2	…	…	…	…	…	…	…	…	…
…	…	…	37	…	…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	116	…	…	…	…	120
…	…	…	…	…	…	…	175	…	…	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…	254	255

Рис. 2. Значення байтів електронного документу, де виконуватиметься інверсія бітів

Інверсія може виконуватися над будь-яким бітом в байті чи кількома одразу. Найпростіший спосіб інвертувати молодший біт у байті, але для того щоб ускладнити завдання вибору параметру інверсії можна використати матричне криптографічне перетворення. Тобто, за допомогою матриці перетворювати задане число, таким чином результат перетворення вказуватиме на порядковий номер біта в байті, який буде інвертуватися. Розглянемо приклад вибору параметру інверсії на основі матричного криптографічного перетворення заданого числа.

Нехай, операція прямого криптографічного перетворення задана матрицею $\vec{F}_k = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$.

Припустимо, потрібно інвертувати один біт в байті. Відповідно необхідно за допомогою матриці перетворити будь-яке значення з проміжку від 1 до 8. Для перетворення числа $2_{dec} = 010_{bin}$, необхідно розв'язати систему рівнянь: $\vec{F}_k = \begin{cases} x_2 \oplus x_3 = y_1 \\ x_1 \oplus x_3 = y_2 \\ x_2 = y_3 \end{cases}$. Підставивши відповідні значення в систему, отримаємо

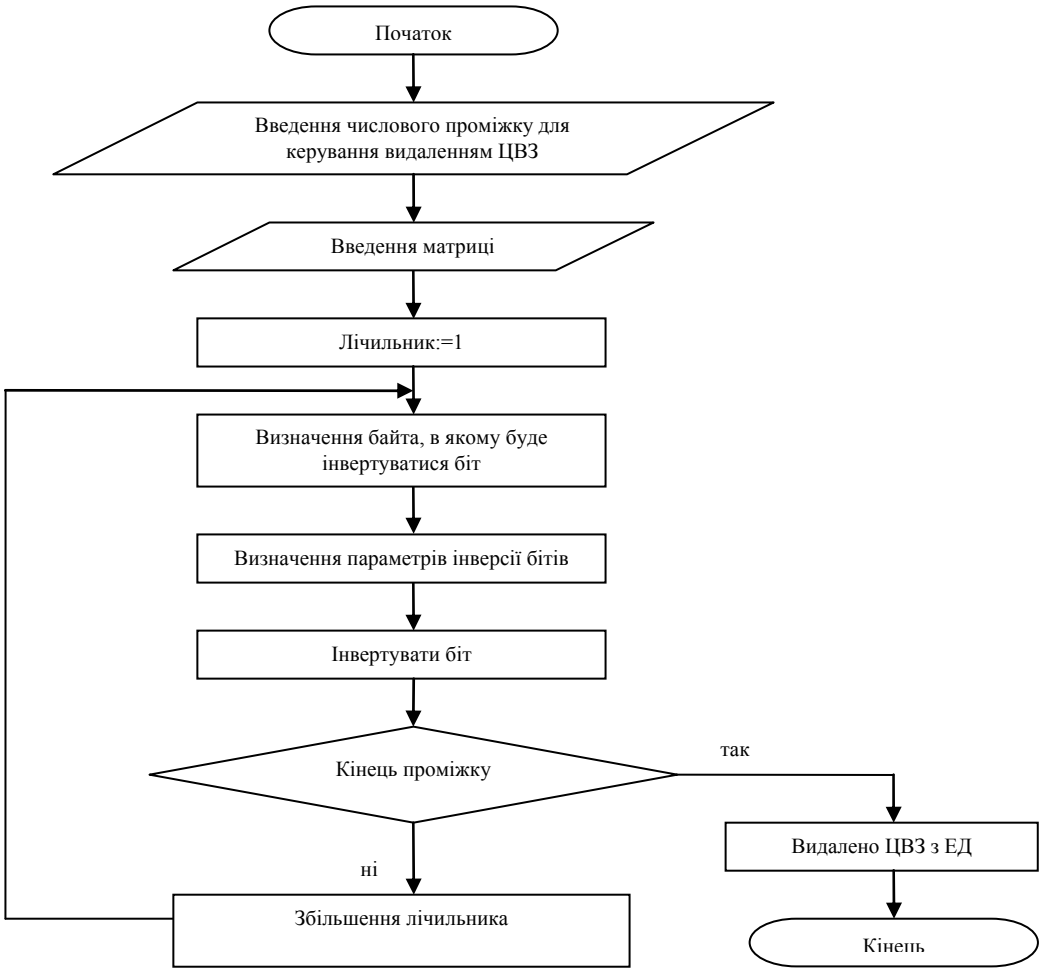


Рис. 3. Відновлення інформації в документі, видалення цифрового водяного знаку

$\vec{F}_k = \begin{cases} x_2 \oplus x_3 \\ x_1 \oplus x_3 \\ x_2 \end{cases} = \begin{cases} y_1 = 1 \\ y_2 = 0 \\ y_3 = 1 \end{cases}$. Отриманий результат $101_{bin} = 5_{dec}$ вказує на те, що буде інвертуватися п'ятий біт в байті.

В результаті матричних криптографічних перетворень були знайдені байти, в яких відбулася інверсія бітів. Для того, щоб вилучити з ЦВЗ з електронного документу, тобто відновити інформацію в документі, необхідно виконати послідовність дій, аналогічну в процесі накладання ЦВЗ, як показано на рис. 3.

В результаті виконання алгоритму показаного на рис. 4, біти, які були інвертовані в процесі накладання ЦВЗ, повертають своє значення, документ набуває свого вихідного стану.

Висновки. В статті було розкрито питання захисту електронних документів засобами стеганографії, зокрема за допомогою цифрового водяного знаку. Таким чином, було запропоновано новий спосіб формування ЦВЗ для електронного документу на основі використання операцій матричного криптографічного перетворення. Алгоритм ґрунтується на матричному перетворенні числових значень з заданого проміжку, які вказують на порядкові номери байтів документу, в яких інвертуватимуться біти. Також показано, що за допомогою матричних перетворень можна визначити параметр інверсії. Сформовано послідовність кроків та структурну схему алгоритму. Запропонований алгоритм можна використовувати, як самостійно для забезпечення достовірності електронного документу, так і в комплексі з електронним цифровим підписом.

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. Балакин А.В. Использование стеганографических методов для защиты текстовой информации / А.В. Балакин, А.С. Елисеев // Спецвузавтоматика. Спецвыпуск. – 2009. – С. 183–184.

5. Сагайдак Д.А. Способ формирования цифрового водяного знака для физических и электронных документов / Д.А. Сагайдак, Р.Т. Файзуллин // Компьютерная оптика. – 2014. – № 1(38). – С. 94–104.

6. Очнев Д.В. Цифровые водяные знаки как метод защиты текстовых печатных документов / Д.В. Очнев, Е.С. Чиркин // Психолого-педагогический журнал Гаудеамус. – 2012. – № 2 (20). – С. 148–149.

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. Balakin, A.V and Yeliseyev, A.S. (2009) Using steganographic methods to protect text information. Spetsvuzavtomatika. Special issue, pp. 183–184.

5. Sagaidak, D.A. and Faizullin, R.T. (2014) Method for forming a digital watermark for physical and electronic documents. Computer optics, 1 (38), pp. 94–104.

6. Ochnev, D.V. and Chirkin, E.S. (2012) Digital watermarks as a method for protecting textual printed documents. Psychological and pedagogical journal Gaudeamus, 2 (20), pp. 148–149.

Рецензія/Peer review : 17.06.2017 р. Надрукована/Printed :13.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Рудницький В. М.

УДК 621.38

Г.І. БАРИЛО, Н.І. КУС, І.П. КРЕМЕР
Національний університет «Львівська політехніка»
В.В. ЛЕСІНСЬКИЙ, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

СХЕМО-ТЕХНІЧНЕ РІШЕННЯ ІНТЕГРАЦІЇ ОРГАНІЧНОГО ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА В СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ СТРУКТУРИ

В роботі вивчаються вихідні та передавальні характеристики розроблених органічних польових тонкоплівкових транзисторів, в яких в якості канального шару органічного напівпровідника використовувались плівки пентацену, а підзатзатворним діелектриком слугувала тонка плівка Al_2O_3. На основі отриманих дослідних зразків транзисторів реалізовано драйвер керування трьохколірною світловипромінюючою органічною структурою.

Ключові слова: органічний польовий тонко плівковий транзистор, підзатворний діелектрик, драйвер.

G.I. BARYLO, N.I. KUS, I.P. KREMER
Lviv Polytechnic National University
V.V. LESINSKY, L.F. POLITANSKY
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

SCHEME-TECHNICAL SOLUTION OF INTEGRATION OF ORGANIC FIELD-EFFECT TRANSISTOR INTO LIGHT-EMITTING STRUCTURES

The present paper is a study of source and transfer characteristics of the developed organic thin-film type field-effect transistors. Pentacene films were used as a channel layer of the organic semiconductor. Thin film Al_2O_3 was used as a gate dielectric. On the basis of the obtained research samples of transistors, there has been constructed a driver for controlling a three-colour light-emitting organic structure. The control driver for the three-color light-emitting organic structure was implemented in this article, which ensures the formation of certain voltage levels on two output channels, which allow forming the required spectral characteristic within the working range from 550 to 750 nm.

Keywords: organic thin-film type field-effect transistor, gate dielectric, driver.

Вступ

Комерційна привабливість органічних напівпровідників обумовлена дешевизною виготовлення та можливістю варіювання фізичними властивостями шляхом підбору методів хімічного синтезу і технологій формування активних складових [1–3]. Здатність інжектування носіїв заряду з електродів в дані матеріали уможливлює виготовлення органічних польових тонкоплівкових транзисторів (ОПТТ). Проте, внаслідок малої рухливості носіїв струму в органічних транзисторах (на 4-5 порядки менше, ніж в кремнієвих транзисторах) діапазон їх робочих частот не перевищує $100\,кГц$ [4–6]. Перевага ОПТТ полягає у технології формування ОПТТ, яка базується на низькотемпературних процесах та дозволяє їх формування на скляних, або гнучких підкладках, що обумовлює зниження їх собівартості при розширенні діапазону використання. На сьогодні існує загально визнана думка, що подальший розвиток органічної електроніки в недалекому майбутньому дозволить успішно впроваджувати різноманітні компоненти електронних пристроїв на основі органічних напівпровідників (в поєднанні з ОПТТ), в гібридних, як зокрема в сонячних батареях, світловипромінювальних діодах, сенсорах, актюаторах тощо [7, 8]. В даній роботі запропоноване схемо-технічне рішення інтеграції розроблених ОПТТ підзатворним діелектриком, в якому шар Al_2O_3 слугує органічними світловипромінювальними структурами.

Експериментальна частинна. Технологічні особливості виготовлення ОПТТ

На рис. 1 наведений переріз розробленого ОПТТ, виготовлення якого здійснюється за простим технологічним маршрутом. На першому етапі на поверхні високолегованої кремнієвої підкладки *n*-типу провідності методом термовакуумного нанесення формується тонка плівка Al, товщина якої становила $d_{Al} = 0{,}1$ мкм і контролювалася в процесі нанесення методом кварцевого резонатора [9]. Підзатворний діелектрик органічної транзисторної структури формувався електрохімічним анодуванням алюмінію з використанням електроліту, отриманого шляхом магнітного змішування лимонної кислоти високої ступені чистоти в дистильованій воді. Густина струму анодування становила $0{,}3\,мА/см^2$ при напрузі $5\,В$. Товщина оксидного шару визначалась тривалістю процесу анодування, що становила $6\,хв$. Наступний етап полягав в покриті структури тонкою плівкою органічного напівпровідника (пентацена) методом термовакуумного нанесення. В якості канального шару органічного напівпровідника використовувались плівки пентацену, що має більшу рухливість носіїв заряду в порівнянні з іншими органічними напівпровідниками [10]. В якості контактів стоку та витоку транзистора використовувалась плівка золота $d_{Au} = 0{,}1\,мкм$, що отримувалась вакуумним методом нанесення через трафаретну маску. Довжина та ширина каналу становили $75\,мкм$ та $10{,}08\,мм$ відповідно.

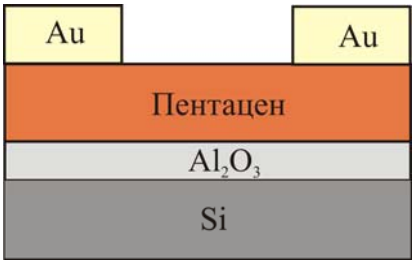


Рис. 1. Структура ОПТТ

Вимірювання характеристик ОПТТ проводилось на повітрі. Вихідні вольт-амперні характеристики отримані за допомогою напівпровідникового параметричного аналізатора (HP 4145A) з використанням вдосконаленої установки «ЗОНД», адаптованої для дослідження ОПТТ.

Дослідження основних властивостей підзатворного діелектрика

З метою визначення питомої ємності та відносної діелектричної проникливості плівки Al_2O_3 формували МДН структуру, де в якості контактів площею $S = 4 \cdot 10^{-4} см^2$ слугувала вакуумно нанесена тонка плівка золота товщиною $1 мкм$. В якості підкладки структури слугували кремнієві підкладки КЭФ-4,5. Вольт-фарадні характеристики (ВФХ) МДН структури вимірювали приладом AUTOLAB з використанням програми GPES і FRA [9]. За отриманими значеннями уявної частини комплексного опору визначалась залежність ємності C структури $Si - Al_2O_3 - Au$ від напруги зміщення, що змінювалась в діапазоні від $-3 В$ до $3 В$ (рис. 2).

При додатних зміщеннях в приповерхневому шарі Si накопичуються електрони. Приповерхневий шар в даному випадку можна розглядати як металеву пластину, а питому ємність МДН структури можна вважати рівною ємності діелектрика $C_i = \varepsilon\varepsilon_o S/d$ [11], де ε – діелектрична проникливість плівки Al_2O_3, S – площа золотих контактів. В режимі збіднення (від'ємне значення напруги зміщення) в МДН структурі домінує приповерхнева ємність Si [11].

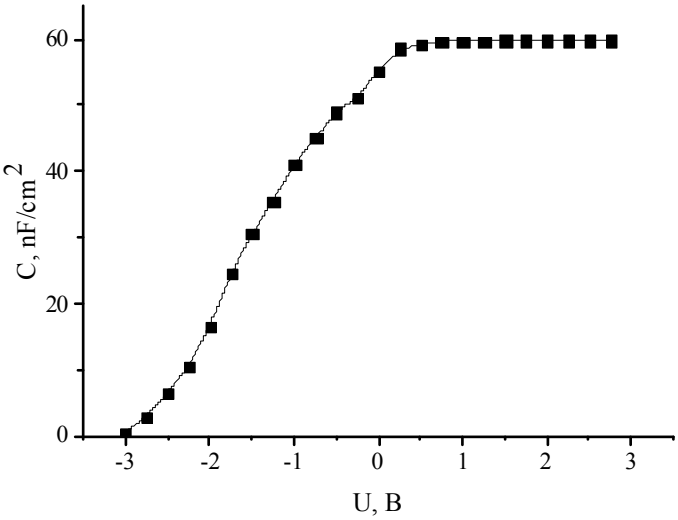


Рис. 2. Залежність питомої ємності структури Si- Al_2O_3-Au від прикладеної напруги

Питома ємність діелектрика становить $59{,}74 нФ/см^2$ при товщині оксиду Al_2O_3 $d_{Al_2O_3} = 0{,}1 мкм$, тобто відносна діелектрична проникність оксиду становить $6{,}74$. Висока діелектрична проникність Al_2O_3 плівки (для порівняння діелектрична проникність $SiO_2 = 3{,}9$) дає змогу формувати ОПТТ з відносно великою товщиною підзатворного оксиду зі збереженням крутизни транзистора.

Дослідження вихідних та передавальних характеристик ОПТТ

Вихідні ВАХ досліджуваних ОПТТ з довжиною каналу $75 мкм$ приведені на рис. 3. Криві залежності струму стоку (I_d) від напруги стоку (V_{ds}) були отримані при зміні напруги на затворі (V_{gs}) з кроком $5 В$. Із отриманих залежностей випливає, що ОПТТ є *p*-канальним. У лінійному режимі, (коли V_{ds} значно менше напруги V_{gs}) та в режимі насичення (коли $V_{ds} > V_{gs} - V_T$ де V_T – порогова напруга), в першому наближені струми стоку ($I_{d,lin}$ і $I_{d,sad}$) визначаються з формул (1) і (2) [5]

$$I_{d,lin} = W \mu C_i (V_{gs} - V_T) V_{ds} / L \quad (1)$$

$$I_{d,sad} = W\mu C_i (V_{gs} - V_T)^2 / 2L \quad (2)$$

де μ – рухливість носії заряду, C – питома ємність діелектрика.

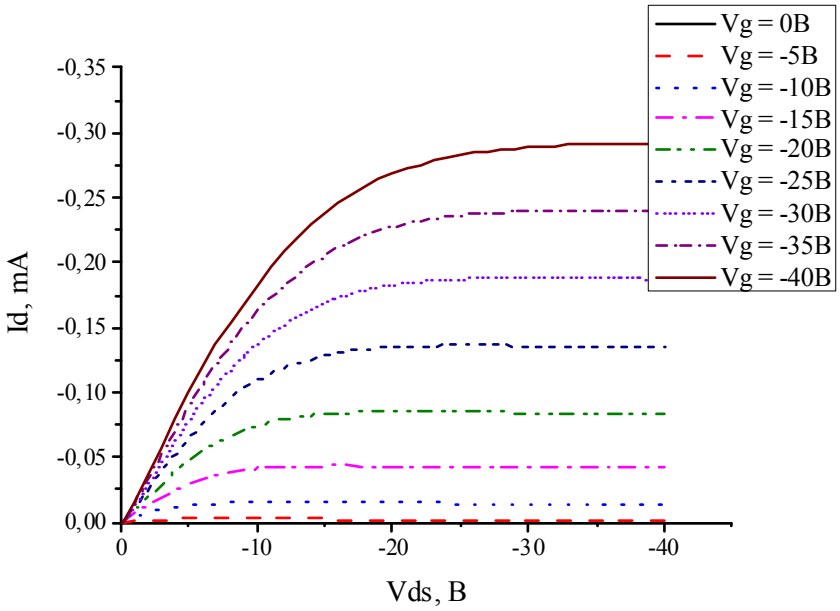


Рис. 3. Вихідні характеристики p-канального ОПТТ

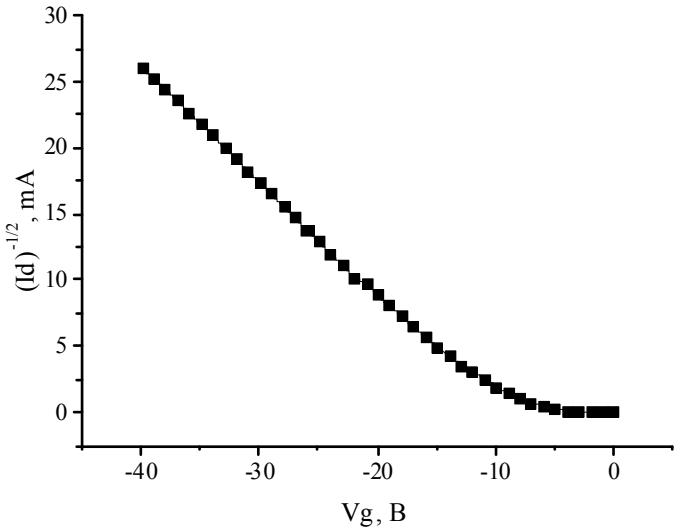


Рис. 4. Передавальні характеристики ОПТТ в лінійному режимі роботи

Із отриманої залежності струму стоку від напруги на затворі (при V_{ds} - const), зображеної на рис. 4, випливає, що порогова напруга ОПТТ становить $V_T = 8{,}1$ В. Добре відомо, що рухливість в значній мірі залежить від природи і структурних недосконалостей підзатворного діелектрика. Пустоти та неоднорідності негативно вливають на носії заряду, це може бути причиною що приводить до низької ефективності ОПТТ. З метою встановлення досконалості Al_2O_3 підзатворного діелектрика в роботі також з'ясовувались значення величин рухливості пентаценового ОПТТ з Al_2O_3 діелектриком та порівнювались зі значеннями рухливості з органічними транзисторами з SiO_2 діелектриком [10].

Із отриманих ВАХ було встановлено, що рухливість носіїв становить $0{,}12\,см^2В^{-1}с^{-1}$. Порівнюючи дане значення зі значеннями рухливості органічного транзистор з SiO_2 діелектриком, що становить $1см^2В^{-1}с^{-1}$ [10], можна стверджувати про конкурентну здатність розробленого ОПТТ.

На основі отриманих дослідних зразків транзисторів реалізовано драйвер керування трьохколірною світловипромінюючою органічною структурою [9]. Драйвер забезпечує формування певних рівнів напруги по двох вихідних каналах, які дозволяють формувати необхідну спектральну характеристику в межах

робочого діапазону від 550 до 750 нм. Напруга живлення кожного з каналів U1 та U2 отримується шляхом комутації певних ключових транзисторів КЛ1-КЛ4 (рис. 5), керування якими здійснюється через відповідні дешифратори команд ДШ1, ДШ2.

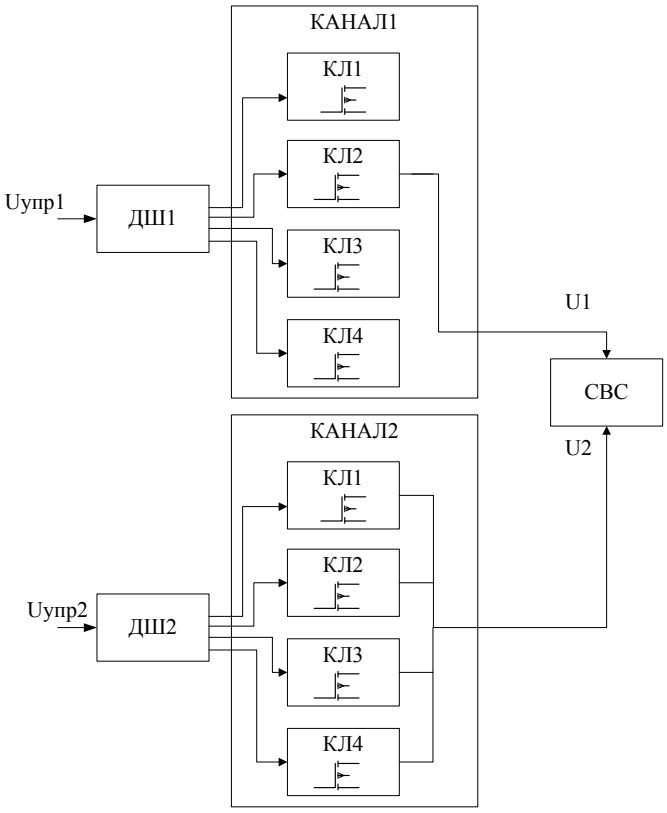


Рис. 5. Структурна схема драйвера світло випромінюючої структури на основі ОППТ

Відповідно до вхідного коду вмикаються певні ключі, які під'єднані через струмообмежувальні резистори до напруги живлення і на світлодіодну структуру подається відповідна напруга. Використання чотирьох транзисторних ключів дає можливість сформувати 16 градацій напруги керування в кожному з каналів і 256 градацій, відповідно, для керування всією структурою, яка забезпечує формування світлового випромінювання в межах робочого діапазону.

Розвиток запропонованого підходу побудови пристроїв керування на основі польових органічних транзисторів є перспективним з точки зору реалізації їх органічних світлових пристроїв у інтегральному виконанні.

Висновки

Порогова напруга органічного *p*-канального плівкового транзистора становить 8,1 В. Рухливість носіїв в канальній області відповідає значенню $0{,}12\,см^2В^{-1}с^{-1}$. Реалізовано драйвер керування трьохколірною світловипромінюючою органічною структурою, що забезпечує формування певних рівнів напруги по двох вихідних каналах, які дозволяють формувати необхідну спектральну характеристику в межах робочого діапазону від 550 до 750 нм.

Література

1. Готра З.Ю. Органічні нанорозмірні світловипромінювальні структури на основі низькомолекулярних матеріалів / З.Ю. Готра, Д.Ю Волинюк. – Львів : Львівської політехніки, 2013. – 204 с.

2. Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brown A.R., Marks R.N., Mackay K., Friend R.H., Burn P.L., Holmes A.B. Light-emitting diodes based on conjugated polymers // Nature. – 1990. – № 347. – P. 539–541.

3. Goetzberger A., Hebling C., Schock H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook // Mater. Sci. Eng. – 2003. – R40. – P. 1–46.

4. Hiroshiba N., Hayakawa R., Chikyow T., Matsuishi K., Wakayama Y. Ambipolar carrier transport in hetero-layered organic transistors consisting of quaterrylene and N,N0-dioctyl-3,4,9, 10-perylenedicarboximide // Organic Electronics. – 2011. – № 12. – P. 1336–1340.

5. Oh J. H., Liu S., Bao Z., Schmidt R., Würthner F. Air-stable n-channel organic thin-film transistors with high field-effect mobility based on N,N′-bis(heptafluorobutyl)-3,4:9,10-perylene diimide // Appl. Phys. Lett. – 2007. – № 91. – P. 212107.

6. Gudeika D., Grazulevicius J. V., Sini G., Bucinskas A., Jankauskas V., Miasojedovas A., Jursenas S.

New derivatives of triphenylamine and naphthalimide as ambipolar organic semiconductors: Experimental and theoretical approach // Dyes and Pigments. – 2014. – № 106. – P. 58–70.

7. Peumans P., Yakimov A., Forrest S.R. Small molecularweight organic thin-film photodetectors and solar cells // J. Appl. Phys. – 2003. – № 93. – P. 3693/

8. Hotra Z., Volyniuk D., Cherpak V., Stakhira P., Grygorchak I., Grazulevicius J., Michaleviciute A., Tomkeviciene A., Barylo G., Kus N., Hladun M. Electro-acoustic effect in organic structure based on star-shaped cabrazole derivatives // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2014. – № 589. – P. 67–73.

9. Voznyak L., Grazulevicius J. V., Cherpak V., Stakhira P., Minaev B., Baryshnikov G., Stromylo E., Helzhynskyy I., Chapran M., Volyniuk D., Hotra Z., Dabuliene A., Tomkeviciene A. Mixing of phosphorescent and exciplex emission in efficient organic electroluminescent devices // Applied Materials & Interfaces. – 2015. – № 7. – P. 1219–1225.

10. Klauk H., Halik M., Zschieschang U., Radlik W. High-mobility polymer gate dielectric pentacene thin film transistors // JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. – 2002. – № 92. – P. 5263.

11. Зи М.С. Физика полупроводниковых приборов / М.С. Зи. – М. : Энергия, 1972. – 655 с.

References

1. Hotra Z.Yu. Orhanichni nanorozmirni svitlovyprominiuvalni struktury na osnovi nyzkomolekuliarnykh materialiv / Z.Yu. Hotra, D.Yu Volyniuk. – Lviv : Lvivskoi politekhniky, 2013. – 204 c.

2. Burroughes J.H., Bradley D.D.C., Brown A.R., Marks R.N., Mackay K., Friend R.H., Burn P.L., Holmes A.B. Light-emitting diodes based on conjugated polymers // Nature. – 1990. – № 347. – P. 539–541.

3. Goetzberger A., Hebling C., Schock H.-W. Photovoltaic materials, history, status and outlook // Mater. Sci. Eng. – 2003. – R40. – P. 1–46.

4. Hiroshiba N., Hayakawa R., Chikyow T., Matsuishi K., Wakayama Y. Ambipolar carrier transport in hetero-layered organic transistors consisting of quaterrylene and N,N0-dioctyl-3,4,9, 10-perylenedicarboximide // Organic Electronics. – 2011. – № 12. – P. 1336–1340.

5. Oh J. H., Liu S., Bao Z., Schmidt R., Würthner F. Air-stable n-channel organic thin-film transistors with high field-effect mobility based on N,N′-bis(heptafluorobutyl)-3,4:9,10-perylene diimide // Appl. Phys. Lett. – 2007. – № 91. – P. 212107.

6. Gudeika D., Grazulevicius J. V., Sini G., Bucinskas A., Jankauskas V., Miasojedovas A., Jursenas S. New derivatives of triphenylamine and naphthalimide as ambipolar organic semiconductors: Experimental and theoretical approach // Dyes and Pigments. – 2014. – № 106. – P. 58–70.

7. Peumans P., Yakimov A., Forrest S.R. Small molecularweight organic thin-film photodetectors and solar cells // J. Appl. Phys. – 2003. – № 93. – P. 3693

8. Hotra Z., Volyniuk D., Cherpak V., Stakhira P., Grygorchak I., Grazulevicius J., Michaleviciute A., Tomkeviciene A., Barylo G., Kus N., Hladun M. Electro-acoustic effect in organic structure based on star-shaped cabrazole derivatives // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2014. – № 589. – P. 67 – 73.

9. Voznyak L., Grazulevicius J. V., Cherpak V., Stakhira P., Minaev B., Baryshnikov G., Stromylo E., Helzhynskyy I., Chapran M., Volyniuk D., Hotra Z., Dabuliene A., Tomkeviciene A. Mixing of phosphorescent and exciplex emission in efficient organic electroluminescent devices // Applied Materials & Interfaces. – 2015. – № 7. – P. 1219–1225

10. Klauk H., Halik M., Zschieschang U., Radlik W. High-mobility polymer gate dielectric pentacene thin film transistors // JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. – 2002. – № 92. – P. 5263.

11. Zy M.S. Fyzyka poluprovodnykovykh pryborov / M.S. Zy. – M. : Enerhyia, 1972. – 655 s.

Рецензія/Peer review : 06.06.2017 р. Надрукована/Printed :05.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Шайко-Шайковський О.Г.

УДК 621.372

Ю.Ф. ЗІНЬКОВСЬКИЙ, А.І. ВИТЯГАНЕЦЬ
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МАГНІТОРЕЗИСТИВНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Наведена статистична обробка результатів для трикратного вимірювання активної потужності магніторезистивним перетворювачем.
Ключові слова: магніторезистивний перетворювач, активна потужність, статистична обробка.

YU.F. ZINKOVSKY, A.I. VYTIAGANETS
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute"

STATISTICAL PROCESSING OF MEASUREMENT OF ACTIVE POWER BY MAGNETORESISTIC CONVERTER

A three-time measurement of active power was performed by a magnetoresistive converter. A verification of the adequacy of the electrical model of the measuring transducer was performed, using the criteria of Student and Fischer. The hypothesis about the adequacy of the mathematical model to the real measuring converter of active power was tested. A hypothesis was adopted that the measurement results are distributed according to the normal law. Checking on criteria Wright, Smirnov, Pearson, Kolmogorov and multi confirmed this assumption. In statistical analysis triple active power measurement result magnetoresistive converter was resolved two problems. First, set some approximate value of the measured value (assessment) that best suits the results. Secondly, the probable deviation of the measurement results from the estimation of the measured value is determined. Point estimates of the received experimental data distributions were determined. The histograms and cumulative curves for experimental data of the measuring transducer were constructed.
Keywords: magnetoresistive converter, active power, statistical processing.

При використанні електромагнітної енергії в технологічних процесах для більш точного контролю за енергетичними параметрами лінії передачі використовують недорогі і надійні вимірювальні магніторезистивні перетворювачі [1, 2].

Було проведено трикратне вимірювання активної потужності магніторезистивним перетворювачем, результати наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювання активної потужності магніторезистивним перетворювачем

№ п/п	f, Гц	k_1, мкВ/Вт	k_2, мкВ/Вт	k_3, мкВ/Вт	№ п/п	f, Гц	k_1, мкВ/Вт	k_2, мкВ/Вт	k_3, мкВ/Вт
1	200	5,8735	5,8328	5,8379	4	10000	5,8685	5,8185	5,8077
2	500	5,8675	5,8318	5,8283	5	50000	5,8612	5,8163	5,8142
3	3000	5,8636	5,8299	5,8141	6	200000	5,8741	5,8489	5,8590

Виконаємо перевірку адекватності електричної моделі вимірювального перетворювача використовуючи критерії Стьюдента і Фішера [3]. Гіпотеза про адекватність математичної моделі не відкидається, якщо залишкова дисперсія $S^2_{зал}$ вихідної величини $\hat{X}_{0м}$, розрахованої по моделі, відносно експериментальних $\hat{X}_{0п}$ не перевищує статистично похибки експерименту, яка визначається дисперсією відтворюваності S^2_0.

Залишкова дисперсія визначається як:

$$S^2_{зал} = \frac{m}{f_1}\sum_{n=1}^{N}\left(\overline{X}_{0п} - \hat{X}_{0п}\right)^2, \quad (1)$$

де $f_1 = (N_m - l)$ – число степенів свободи; N – кількість груп паралельних дослідів $(N_m - 19)$; m – число паралельних дослідів в одній групі $(m = 3)$; l – число зв'язків $(l = n^* + 1)$; n^* – кількість факторів (кількість зовнішніх впливів) $(n^* = 4, l = 5)$; $\overline{X}_{0п} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} X_{0п_k}$ – середнє значення вихідного параметру по результатам паралельних дослідів $(m = \overline{1,3})$, $(n = \overline{1,19})$.

Щоб визначити дисперсію відтворюваності S^2_0, необхідно мати кілька значень вихідного параметру, виміряного при однакових умовах. Експериментальні значення $X_{0п_k}$ отримані при трьох паралельних дослідженнях, і значення вихідної величини, розрахованої по моделі $\hat{X}_{0м}$, представлені в табл. 2.

Дисперсія відтворюваності

$$S_0^2 = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} S_n^2 \ , \qquad (2)$$

де $S_n^2\left(n=\overline{1,19}\right)$ – вибіркові дисперсії.

$$S_{\text{п}}^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{k=1}^{m}\left(X_{0\text{п}_{\text{k}}} - \hat{X}_{0\text{п}}\right)^2 . \qquad (3)$$

Таблиця 2

Вихідні дані та результати розрахунку перевірки адекватності математичної моделі перетворювача

№ п/п	f, Гц	$\hat{X}_{0\text{м}}$, мкВ	Експериментальні дані, $X_{0\text{п}_{\text{k}}}$, мкВ			$\overline{X}_{0\text{п}}$, мкВ	$\left(\hat{X}_{0\text{м}} - \overline{X}_{0\text{п}}\right)^2$ мкВ·10^2	$S_{\text{п}}^2 \cdot 10^4$
			1	2	3			
1	200	5,9459	5,8735	5,8328	5,8379	5,8481	0,9571	4,9164
2	500	5,9459	5,8675	5,8318	5,8283	5,8425	1,0685	4,7056
3	3000	5,9459	5,8636	5,8299	5,8141	5,8359	1,2107	6,3926
4	10000	5,9459	5,8685	5,8185	5,8077	5,8316	1,3072	10,5221
5	50000	5,9457	5,8612	5,8163	5,8142	5,8306	1,3256	7,0490
6	200000	5,9420	5,8741	5,8489	5,8590	5,8607	0,6615	1,6084

Число степенів свободи, які характеризують дисперсію

$$f_2 = N(m-1). \qquad (4)$$

Гіпотеза про адекватність математичної моделі не відкидається, якщо виконується нерівність

$$F = \frac{S_{\text{зал}}^2}{S_0^2} < F_{\text{T}}(f_1, f_2), \qquad (5)$$

де F_{T} – значення критерію Фішера, яке знайдемо по таблиці розподілу Фішера для вибраного рівня значимості $q = 5\%$ і заданих значень $f_1 = 52$, $f_2 = 38$: $F_{\text{T}} = 2{,}74$.

Якщо $S_{\text{зал}}^2 / S_0^2 < 1$, то математична модель адекватно описує досліджуваний об'єкт з рівнем значимості $q = 1\%$ і наперед адекватно з рівнем значимості $q = 5\%$.

Результати розрахунку величин, виконаних по формулам (1) – (5) для вихідних даних (табл. 1), представлені в табл. 2. При цьому $N = 19$; $m = 3$; $l = 5$; $f_1 = 52$; $f_2 = 38$. На основі виразів (1), (2) і даних, представлених в табл. 2, знаходимо залишкову і дисперсію відтворюваності: $S_{\text{зал}}^2 = 1{,}2572 \cdot 10^{-3}$, $S_0^2 = 7{,}2249 \cdot 10^{-4}$. Використовуючи (5) отримуємо $F = 1{,}7321 < F_{\text{T}}(52{,}38) = 2{,}74$.

Таким чином, гіпотеза про адекватність (з рівнем значимості $q = 5\%$) математичної моделі реальному вимірювальному перетворювачу активної потужності не відкидається.

Формула для визначення критерію Стьюдента має вигляд:

$$t_p = \frac{\overline{X}_{0\text{п}} - \hat{X}_{0\text{п}}}{S_{\text{сум}}\sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n_m}}}, \qquad (6)$$

де $\overline{X}_{0\text{п}}$ – середнє значення вихідної величини вимірювального перетворювача для серії досліджень; m – число паралельних досліджень $(m = 3)$; n_m – об'єм вибірки для моделі $(n_m = 3)$;

$$S_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{\sum \overline{X}_{0\text{п}}^2 - \sum \hat{X}_{0\text{п}}^2}{m + n_m - 2}} = 0{,}9301, \qquad t_p = \frac{\overline{X}_{0\text{п}} - \hat{X}_{0\text{п}}}{S_{\text{сум}}\sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n_m}}} = 0{,}1288 .$$

Використовуючи таблицю t-розподілу [2], отримаємо, що $t_4(0{,}995) = 4{,}604$. Оскільки $t_p < t_{\text{табл}}$, то можна стверджувати, що модель вимірювального перетворювача активної потужності адекватна і в середньому описує роботу реального перетворювача.

Для статистичної обробки, наведених в таблиці 1, результатів вимірювання трьох груп величин коефіцієнтів перетворення активної потужності k_1, k_2, k_3 використаємо методику наведену в [3]:

1. Розташуємо результати вимірювань k_i в порядку зростання.
2. Для мінімального і максимального значень k_i визначимо діапазон кожної з груп, таблиця 3.

$$\Delta K = k_n - k_i. \qquad (7)$$

Таблиця 3

Діапазон та ширина інтервалу

	Група вимірювання 1	Група вимірювання 2	Група вимірювання 3
Діапазон ΔK	0,0215	0,0378	0,0562
Ширина інтервалу Δk	0,0043	0,0076	0,0112

Відповідно до рекомендацій [4] розіб'ємо цей діапазон на $L=5$ інтервалів шириною

$$\Delta k=\Delta K/L. \quad (8)$$

Визначимо границі інтервалів $k_{\min j}$ і $k_{\max j}$ і їх середини $k_{cp\,j}$, табл. 4 як

$$k_{\min 1}=k_1, \qquad k_{\max j}=k_{\min j}+\Delta k, \qquad k_{cp\,j}=\frac{k_{\max j}+k_{\min j}}{2}. \quad (9)$$

Таблиця 4

Границі інтервалів і їх середини

j	Група вимірювань 1			Група вимірювань 2			Група вимірювань 3		
	$k_{min\,j}$	$k_{max\,j}$	$k_{cp\,j}$	$k_{min\,j}$	$k_{max\,j}$	$k_{cp\,j}$	$k_{min\,j}$	$k_{max\,j}$	$k_{cp\,j}$
1	5,8563	5,8606	5,8585	5,8111	5,8186	5,8149	5,8028	5,8140	5,8084
2	5,8606	5,8649	5,8628	5,8186	5,8262	5,8224	5,8140	5,8252	5,8196
3	5,8649	5,8692	5,8671	5,8262	5,8338	5,8300	5,8252	5,8365	5,8309
4	5,8692	5,8735	5,8714	5,8338	5,8413	5,8375	5,8365	5,8477	5,8421
5	5,8735	5,8778	5,8757	5,8413	5,8489	5,8451	5,8477	5,8590	5,8534

4. Розрахуємо кількість результатів вимірювання m_j у кожному інтервалі j.

5. Побудуємо гістограми у вигляді стовпчиків шириною Δk і висотою m_j, рис. 6.

6. Визначимо імовірність того, що результати вимірювань k_i будуть меншими, ніж границі інтервалів $k_{грj}$

$$F_j=P(k_j<k_{грj}), \quad (10)$$

де $k_{грj}=k_{maxj}=k_{min(j+1)}$; $F_0=0$; $F_1=m_1/n$; $F_2=(m_1+m_2)/n$; … ; $F_k=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}m_j$; … ; $F_{k+1}=\frac{1}{L}\sum_{j=1}^{L}m_j=1$.

7. Побудуємо кумулятивні криві для експериментальних даних, рис. 1.

8. Визначимо точкові оцінки отриманих розподілів експериментальних даних (середнє арифметичне, медіану, середнє арифметичне границь варіаційного ряду), розсіювання (дисперсію і середнє квадратичне відхилення результатів вимірювання), асиметрію і гостровершинність. Результати розрахунку характеристик положення точкових оцінок занесемо до таблиці 5.

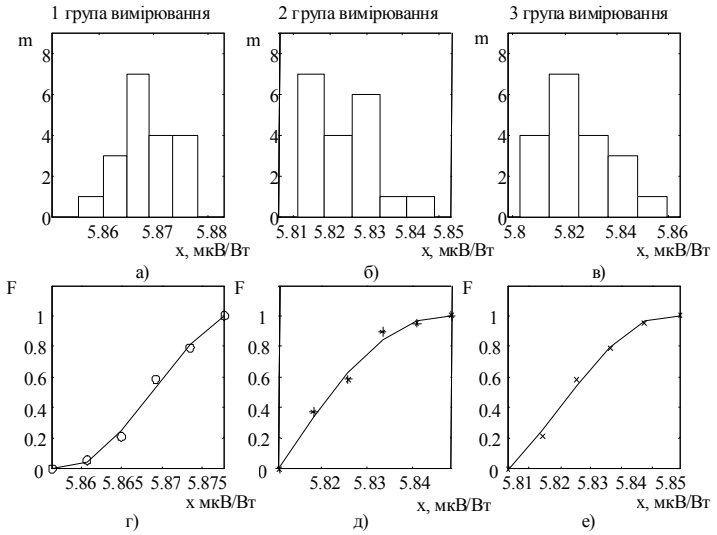


Рис. 1. Гістограми і кумулятивні криві

Таблиця 5

Точкові оцінки отриманих розподілів експериментальних даних

Точкові оцінки	Група 1	Група 2	Група 3
Середнє арифметичне $\bar{x}$	5,8685	5,8241	5,8245
Середнє арифметичне границь варіаційного ряду x_{cp}	5,8671	5,8149	5,8084
Медіана Me	5,8675	5,8239	5,8220
Оцінка дисперсії результату вимірювання $\hat{D}_X$	$2{,}9381\cdot10^{-5}$	$9{,}1148\cdot10^{-5}$	$2{,}0654\cdot10^{-4}$
Оцінка середньоквадратичного відхилення $\hat{\sigma}_X$	0,0054	0,0095	0,0144
Оцінка середньоквадратичного відхилення $\hat{\sigma}_{\bar{X}}$	0,0012	0,0022	0,0033
Оцінка асиметрії $\hat{A}$	-0,3599	0,5870	0,5176
Оцінка ексцесу $\hat{E}$	-0,6076	0,0566	-0,4515

З таблиці 5 видно, що найбільшу дисперсію результату експерименту (середньоквадратичне відхилення) має 3-я група вимірювання. З оцінки асиметрії можна зробити висновок, що крива щільності розподілу 1-ї групи з від'ємною асиметрією лежатиме лівіше симетричного розподілу імовірності, величина асиметрії якої дорівнює нулю, а 2-і і 3-ї груп з позитивною асиметрією – правіше. Ексцес у законів розподілу імовірності буде близький до нуля, якщо їх крива щільності імовірності буде мати дзвонувату форму. Криві з більш гострою вершиною мають позитивний ексцес (2-а група вимірювання), а з більш пологою – від'ємний ексцес (1-а і 3-я групи вимірювання).

Оскільки ексцес Е знаходиться в межах $-1<E<1$, тобто розподіл близький до нормального (Е=0), то за оцінку розподілу візьмемо середнє арифметичне. Визначимо границі випадкової похибки результатів вимірювань, наведених в таблиці 1, для довірчої імовірності $P_д$=0,9973 і рівня значимості критеріїв узгодженості α=0,05.

Для визначення границь випадкової похибки по результатам трикратних спостережень виконаємо наступні операції:

Виключимо з результатів спостереження грубі похибки.

Обчислимо середнє арифметичне виправлених результатів спостережень або оцінку математичного очікування, яка приймається за результат вимірювання.

Обчислимо середньоквадратичне відхилення результату вимірювання $\hat{\sigma}_X$ та його оцінку $\hat{\sigma}_{\overline{X}}$.

Перевіримо гіпотезу про те, що результати спостережень належать вибраному закону розподілу.

Обчислимо довірчі границі випадкової похибки результатів вимірювання.

По виду гістограм і кумулятивних кривих, рис. 1, а також по отриманим точковим результатам асиметрії і ексцесів, табл. 5, приймаємо гіпотезу про те, що результати вимірювання розподілені по нормальному закону. Перевірка по критеріям Райта, Смирнова, Пірсона, Колмогорова та багатоскладовому підтвердила дане припущення.

Отже, магніторезистивний перетворювач має похибку вимірювання $\pm 1{,}163\,\%$ в діапазоні частот від 200 Гц до 200 кГц при розсіюванні результату вимірювання $0{,}37\,\%$ [5].

Висновки

При статистичній обробці трикратного результату вимірювання активної потужності магніторезистивним перетворювачем було вирішено дві задачі. По-перше, визначено деяке наближене значення виміряної величини (оцінку), що найкращим чином відповідає отриманим результатам. По-друге, визначено імовірні відхилення результатів вимірювань від оцінки виміряної величини.

Література

1. Витяганець А.І. Широкополосний магніторезистивний вимірювальний перетворювач активної потужності середніх частот / А.І. Витяганець // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : 11-й междунар. молодеж. форум, 10–12 апр. 2007г. : тезисы докл. – Х., 2007. – С. 334.
2. Вунтесмери В.С. Исследование частотной характеристики магниторезистивного измерительного преобразователя активной мощности низких частот / В.С. Вунтесмери, А.И. Вытяганец // Известия вузов. Серия "Радиоэлектроника". (НТУУ "КПИ"). – 2007. – № 12. – С. 45–48.
3. Таланчук П.М. Моделирование и оптимизация на ЭВМ измерительных преобразователей / Таланчук П.М., Фомин М.Н., Сергеев В.В. – К. : Вища школа, 1991. – 250 с.
4. Захаров И.П. Обработка результатов измерений: учеб. пособие / Захаров И.П. – Харьков : Изд-во НУЖД, 2002. – 126 с.
5. Витяганець А.І. Інтерфейс магніторезистивного перетворювача активної потужності / А.І. Витяганець // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2009. – Вип. 39. – С. 113–117.

References

1. Vytiahanets A.I. Shyrokopolosnyi mahnitorezystyvnyi vymiriuvalnyi peretvoriuvach aktyvnoi potuzhnosti serednikh chastot / A.I. Vytiahanets // Radyoelektronyka y molodezh v XXI veke : 11-y mezhdunar. molodezh. forum, 10–12 apr. 2007h. : tezysy dokl. – Kh., 2007. – C. 334.
2. Vuntesmery V.S. Yssledovanye chastotnoi kharakterystyky mahnytorezystyvnoho yzmerytelnoho preobrazovatelia aktyvnoi moshchnosty nyzkykh chastot / V.S. Vuntesmery, A.Y. Vytiahanets // Yzvestyia vuzov. Seryia "Radyoelektronyka". (NTUU "KPY"). – 2007. – # 12. – C. 45–48.
3. Talanchuk P.M. Modelyrovanye y optymyzatsyia na ЭVM yzmerytelnykh preobrazovatelei / Talanchuk P.M., Fomyn M.N., Serheev V.V. – K. : Vyshcha shkola, 1991. – 250 s.
4. Zakharov Y.P. Obrabotka rezultatov yzmerenyi: ucheb. posobye / Zakharov Y.P. – Kharkov : Yzd-vo NUZhD, 2002. – 126 s.
5. Vytiahanets A.I. Interfeis mahnitorezystyvnoho peretvoriuvacha aktyvnoi potuzhnosti / A.I. Vytiahanets // Visnyk NTUU «KPI». Ser. Radiotekhnika. Radioaparatobuduvannia. – 2009. – Vyp. 39. – S. 113–117.

Отримана/Received : 17.06.2017 р. Надрукована/Printed :14.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н. Уваров Б.М.

УДК 004.056.55, УДК 004.421.5

О.В. ГРЕСЬ, М.І. СКРИПСЬКИЙ
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
В.М. КОСОВАН
Чернівецький ліцей № 1
Г.М. РОЗОРІНОВ
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ

Досліджені генератори псевдовипадкових послідовностей на основі дискретних відображень. Тестування статистичних властивостей проводилось з використанням пакету тестів NIST STS 2.1.2. Запропонований генератор псевдовипадкових послідовностей на основі комбінації лінійного конгруентного генератора та генератора на основі логістичного відображення для якого встановлено діапазон значень параметру керування λ при якому послідовності, генеровані запропонованим генератором задовольняють вимогам статистичних тестів. Проведені дослідження чутливості та криптостійкості генераторів псевдовипадкових послідовностей на основі дискретних відображень.

Ключові слова: генератор, логістичне відображення, псевдовипадкова послідовність, статистичні тести, криптостійкість.

O.V. HRES, M.I. SKRYPSKYJ
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
V.M. KOSOVAN
Chernivtsi Lyceum №1
G.M. ROZORYNOV
Natoinal Technical
University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

THE RESEARCH OF GENERATORS OF PSEUDORANDOM SEQUENCES BASED ON DISCRETE MAPPINGS

We study the generators of pseudorandom sequences based on discrete mappings. Testing of statistical properties was performed using the NIST STS 2.1.2 test package. The proposed pseudorandom sequence generator based on a combination of a linear congruent generator and a generator based on logistic mapping for which a range of values of the control parameter λ is established for which the sequence generated by the proposed generator satisfies the requirements of statistical tests. The investigates of sensitivity and cryptography stability of pseudorandom sequence generators on the based of discrete mappings. To investigate the statistical priorities of generators used test NIST STS 2.1.2. From the results of research generator set, generator based on a combination of linear congruent generator and generator based on logistic map satisfies the requirements of cryptographic tests at values control parameters λ∈ [3,97; 4], while the generator based on logistic map that value is within λ∈ [3.99 4]. Research on the cryptography stability of input parameters was conducted using the "brute force" attack. Analysis of the cryptography stability of generators showed that exhaustive search for clues at management settings setting accuracy of 11 decimal places must be expended under control parameter values λ∈ [3,99; 4], while the values of λ∈ [3,97; 4] time costs amount to 9,5 years.

Keywords: generator, logistic mapping, pseudo-random sequence, statistical tests, cryptography stability.

Вступ

В останні роки бурхливим розвитком телекомунікаційних систем, інтернет технологій, IP-телефонії постала проблема захисту інформації, що передається по цифровим каналам зв'язку через мережу Internet/Ethernet. Сучасні інформаційні системи вимагають забезпечення високої скритності і конфіденційності зв'язку. Захист інформації, яка передається в таких системах можливий шляхом її шифрування за допомогою криптостійких бінарних послідовностей [1–3].

Генерування криптостійких бінарних послідовностей є на сьогоднішній день актуальною задачею. Генератори ключових послідовностей є невід'ємними і важливими елементами будь-яких криптографічних додатків. На даний час відомі алгоритми генерування криптостійких бінарних послідовностей на основі еліптичних кривих, клітинних автоматів, теорії детермінованого хаосу [1–3].

Основною особливістю генераторів бінарних послідовностей, алгоритми генерування яких реалізовані на основі теорії детермінованого хаосу, є висока чутливість до зміни початкових умов [1–3].

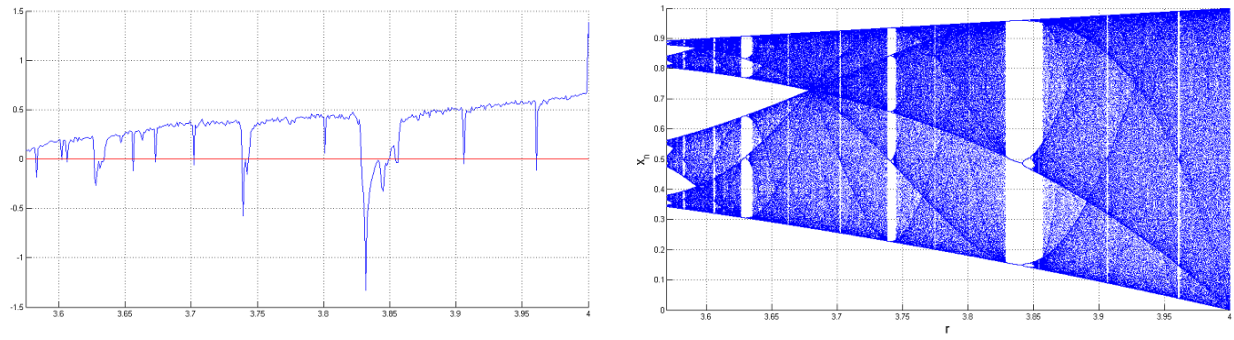
Дослідження статистичних характеристик генератора бінарних послідовностей на основі логістичного відображення

Генерування цифрових хаотичних послідовностей здійснюється з використанням певної аналітичної функції, значення якої за певних початкових умовах рівномірно розподілені на обмеженому інтервалі. Такою властивістю володіють розв'язки логістичного рівняння, що описується формулою (1):

$$x_{n+1} = \lambda \cdot x_n (1 - x_n), \tag{1}$$

де λ – параметр, x_0 – початкова умова для генерування послідовностей.

Залежно від значення λ генеровані коливання можуть бути періодичними, квазіперіодичними або хаотичними [4,5].

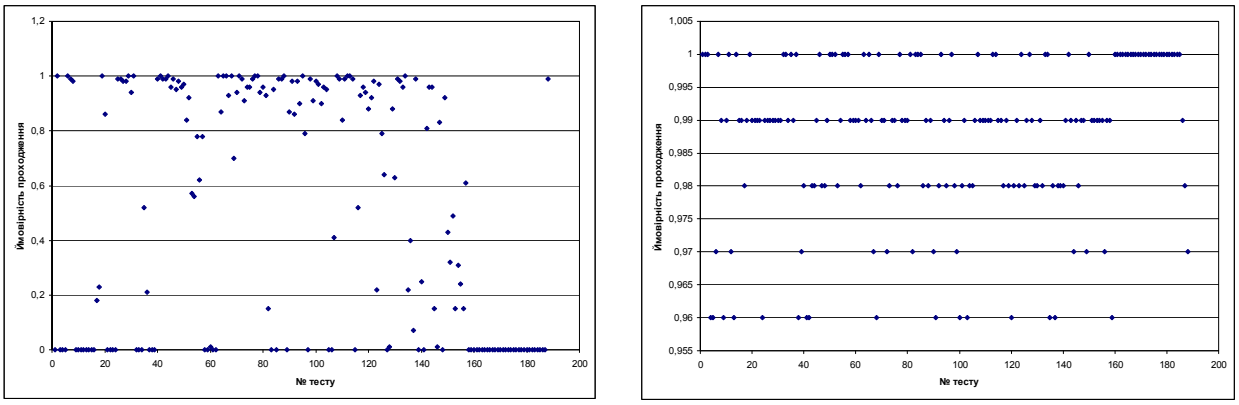


а б

Рис. 1. Показник Ляпунова для логістичного відображення при значеннях $\lambda \in$ [3,56;4] а) та біфуркаційна діаграма для значень λ ∈ [3,56;4] б) відповідно

Із залежностей показника Ляпунова від параметру керування λ (рис.1а) та біфуркаційної діаграми (рис. 1б) логістичного відображення випливає, що при $\lambda \geq 3{,}56$ показник Ляпунова набуває додатніх значень, а біфуркація подвоєння періоду має велику частоту, що і вказує на хаотичну природу коливань [4,5].

Проведемо дослідження генератора псевдовипадкових послідовностей на базі логістичного відображення, що може використовуватись в методах потокового шифрування інформації як генератор ключових послідовностей [3–5]. Для цього використаємо пакет статистичних тестів NIST STS 2.1.2. при значеннях параметру керування λ ∈ [3,56;4]. Тестуванню підлягали 10^3 послідовностей довжиною $m=10^6$ бітів кожна, таким чином досліджуваний масив становить 10^9 бітів. Для детального аналізу було проведено тестування генератора при різних значеннях параметру керування λ ∈ [3,56;4]. Побудовані за результатами тестування статистичні портрети генератора, приведені на рис. 2 а та 2 б, відповідно.



а б

Рис. 2. Статистичний портрет генератора на основі логістичного відображення
а - при значеннях параметру керування λ=3,78 та початковій умові x_0=0,5;
б - при значеннях параметру керування λ=3,99 та початковій умові x_0=0,5

Із отриманих результатів випливає, що при зміні параметра керування в межах λ ∈ [3,56;4], кількість тестів, за якими випробування є незадовільними зменшується, тобто якість генерованих послідовностей з точки зору випадковості покращується. Зокрема, при значеннях параметру λ=3,99 та початкової умови x_0=0,5 більшість тестів пройдено на рівні більше 0,96, що вказує на псевдовипадковий характер генерованих послідовностей. За результатами досліджень можна зробити висновок, що значення параметру керування λ, при яких даний генератор задовольняє вимогам криптографічних тестів, знаходиться в діапазоні λ ∈ [3,99;4] [4,5].

Таблиця 1

Результати проходження тестів NIST генератором на основі логістичного відображення (при значеннях параметру керування λ=3,99 та початковій умові x_0=0,5) та генераторами BBS та ANSI (3-DES)

Генератор	Кількість тестів, пройдених більше 99% послідовностей	Кількість тестів, пройдених більше 96% послідовностей
Генератор BBS	134 (71,3%)	188 (100%)
Генератор ANSI X9.17 (3-DES)	121 (64,4%)	188 (100%)
Генератор на основі логістичного відображення	128 (68,1%)	188 (100%)

У таблиці 1 приведені результати порівняння властивостей послідовностей, генерованих на основі логістичного відображення із властивостями псевдовипадкових послідовностей (ПВП), сформованими генераторами BBS та ANSI X9.17 (3-DES) (тестова вибірка, рекомендована NIST) [10].

Із отриманих практичних результатів випливає, що генеровані за логістичним дискретним відображенням ПВП мають задовільні статистичні характеристики в діапазоні значень параметру керування $\lambda \in [3{,}99;4]$. Отже, недоліком даного генератора є обмеженість діапазону параметру керування для генерування ПВП. Тому більш ефективним методом для генерування криптостійких ПВП буде використання комбінації генераторів.

Дослідження статистичних характеристик генератора бінарних послідовностей з нормальним розподілом значень їх елементів

Блок-схема генератора псевдовипадкових послідовностей з нормальним розподілом значень їх елементів приведена на рис. 3.

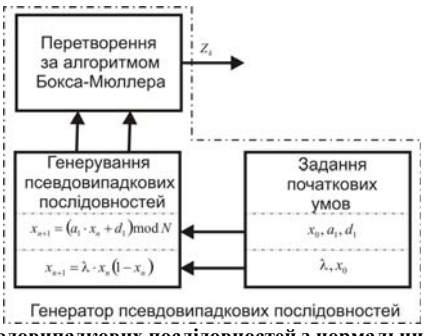


Рис. 3. Блок-схема генератора псевдовипадкових послідовностей з нормальним розподілом значень їх елементів

Робота генератора базується на основі двох генераторів псевдовипадкових послідовностей, які працюють з різними початковими умовами, генератора на основі логістичного відображення (1) та лінійного конгруентного генератора (2) [6-8]:

$$x_{n+1} = (a_1 \cdot x_n + d_1) \bmod N, \tag{2}$$

де *a, d, N* – константи. При проведенні досліджень вибиралися наступні значення параметрів: для лінійного конгруентного генератора такі, що забезпечують максимальне значення періоду повторень (наприклад $a = 7^5 = 16807$, $d = 7$ та $N = 2^{31}-1 = 2147483647$), а для логістичного відображення значення початкової умови та параметру керування становили $x_0 = 0{,}5$ та $\lambda \in [3{,}56;4]$ відповідно.

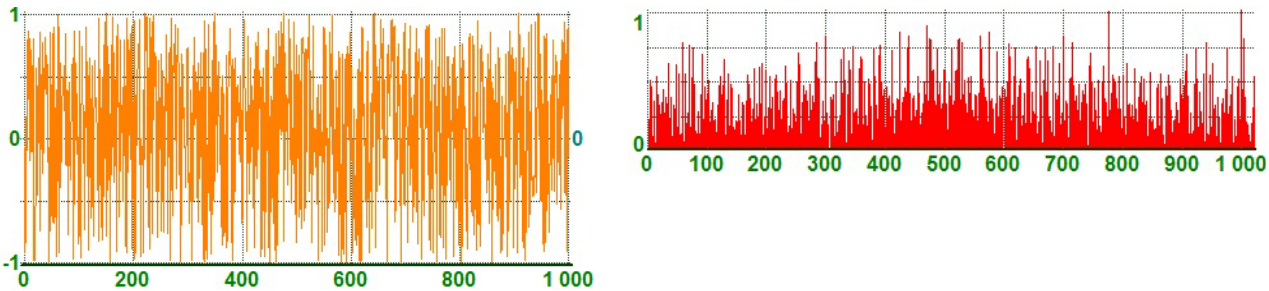
Вихідні послідовності цих генераторів перетворюються за допомогою алгоритму Бокса-Мюллера [7–9] в послідовність псевдовипадкових дійсних чисел, що належать інтервалу [-1;1], розподілених за законом Гауса згідно наступних співвідношень:

$$\nu = x_1^2 + x_2^2, \tag{3}$$

$$z_1 = x_1 \cdot \sqrt{\frac{-2\log(\nu)}{\nu}}, \quad z_2 = x_2 \cdot \sqrt{\frac{-2\log(\nu)}{\nu}}, \tag{4}$$

де x_1, x_2 два числа, отримані від генераторів псевдовипадкових чисел, а y_1, y_2 – два псевдовипадкових нормально розподілених числа. Якщо при цьому сума квадратів чисел x_1 та x_2 є більшою за 1, тобто $\nu = x_1^2 + x_2^2$, то даний результат приймається та вибирається наступне випадкове число.

Програмна реалізація даного генератора здійснювалась на мові програмування Delphi 7. Вигляд генерованої послідовності та її спектральне представлення показані на рис. 4 а та 4 б, відповідно.



а б

Рис. 4. Вигляд послідовності, сформованої генератором псевдовипадкових послідовностей з нормальним розподілом значень їх елементів а - часове представлення послідовності, б - спектральне представлення послідовності

Дослідження запропонованого генератора ПВП з нормальним розподілом проводилось з використанням статистичних тестів NIST STS 2.1.2. Для тестування було обрано 10^3 послідовностей довжиною $m=10^6$ бітів кожна, таким чином досліджуваний масив становить 10^9 бітів.

Для детального аналізу було проведено тестування генератора при різних значеннях параметру керування $\lambda \in [3{,}56;4]$. Побудовані за результатами тестування статистичні портрети генератора, приведені

на рис. 5.

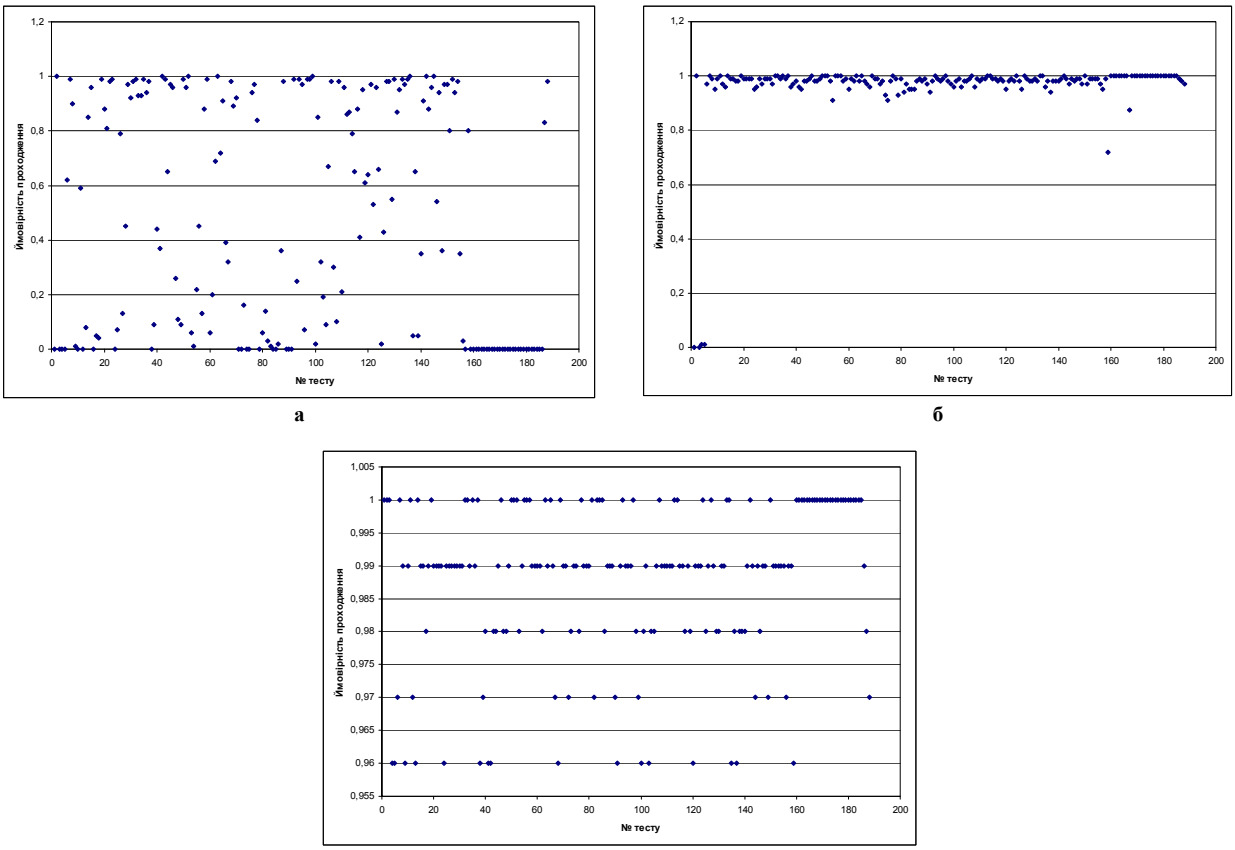


Рис. 5. Статистичні портрети генератора псевдовипадкових послідовностей з нормальним розподілом їх значень при значенні початкової умови x_0=0,5 та значеннях параметру керування: а - λ=3,78; б - λ=3,92; в - λ=3,975

Із отриманих результатів випливає, що при зміні параметра керування в межах λ ∈ [3,56;4], кількість тестів, за якими випробування є незадовільними зменшується, тобто якість генерованих послідовностей з точки зору випадковості покращується. Зокрема, при значеннях параметру λ=3,97 та початкової умови x_0=0,5 більшість тестів пройдено на рівні більше 0,96, що вказує на псевдовипадковий характер генерованих послідовностей (на рис. 5в зображений статистичний портрет при одному з випадків, зокрема при λ=3,975). За результатами досліджень можна зробити висновок, що значення параметру λ при яких даний генератор задовольняє вимогам криптографічних тестів знаходиться в діапазоні λ ∈ [3,97;4] [5,6].

В таблиці 2 приведені результати порівняння властивостей ПВП, генерованих запропонованим генератором з нормальним розподілом (при одному із значень параметру керування, зокрема при λ=3,975) із генератором псевдовипадкових бітів BBS та генератором ANSI X9.17 (3-DES) (тестова вибірка, рекомендована NIST) (тестова вибірка, рекомендована NIST).

Таблиця 2

Результати проходження тестів NIST генератором з нормальним розподілом (при значеннях параметру керування λ=3,975 та початковій умові x_0=0,5) та генераторами BBS та ANSI (3-DES)

Генератор	Кількість тестів пройдених більше 99% послідовностей	Кількість тестів пройдених більше 96% послідовностей
Генератор BBS	134 (71,3%)	188 (100%)
Генератор ANSI X9.17 (3-DES)	121 (64,4%)	188 (100%)
Генератор з нормальним розподілом	132 (70,2%)	188 (100%)

З результатів дослідження генераторів встановлено, що генератор на основі комбінації лінійного конгруентного генератора та генератора на основі логістичного відображення задовольняє вимогам криптографічних тестів при значеннях параметру керування λ ∈ [3,97;4]., тоді як для генератора на основі логістичного відображення це значення знаходиться в межах [3,99;4]. Отже, при використанні комбінації генераторів для генерування ПВП потужність простору ключів зростає.

Вцілому, із проведених результатів досліджень випливає, що вище наведені генератори ПВП на основі дискретних відображень мають задовільні статистичні характеристики, а генеровані бітові послідовності задовольняють вимогам статистичних тестів NIST, тобто їх можна вважати статистично

безпечними.

Дослідження криптостійкості дискретних відображень за вхідними параметрами

Дослідження криптостійкості за вхідними параметрами проведемо з використанням атаки “груба сила”. Атака “груба сила” [10] типу перебирання ключів описується кількістю варіантів (команд) що необхідно виконати для встановлення ключа (дешифрувати його). Основним показником методу перебору є кількість варіантів перебирання та час перебирання [10]:

Ключем для генерування послідовностей шифрування з використанням логістичного відображення є значення параметра керування λ і початкове значення x_0. При цьому кількість ключів для генерування послідовностей визначатиметься за наступною формулою:

$$N = (10^n)^2 \tag{5}$$

де n - точність завдання параметрів (кількість знаків після коми).

У нашому випадку точність введення n для λ і x_0 задаватиметься із точністю до десятого знаку (мінімально), що відповідає потужності простору ключів $(10^{10})^2 = 10^{20}$, а час перебору ключів становитиме [10]:

$$t = \frac{N_K}{\gamma \cdot K} P_P, \tag{6}$$

де N_K – число ключів, що можуть використовуватись в системі, γ – потужність криптоаналітичної системи; P_P – ймовірність успішного криптоаналізу; $K = 3{,}15 \times 10^7$ – кількість секунд у році, t – час повного перебору в роках.

Враховуючи, що потужність криптоаналітичної системи становить $\gamma = 10^{11} - 10^{12}$ комбінацій за секунду, матимемо:

$$t = \frac{10^{20}}{10^{12} \cdot 3{,}15 \cdot 10^7} = 3{,}17$$

Отже перебір варіантів при заданій точності займе 3,17 років.

В таблиці 3 приведені часові витрати необхідні для перебору всіх можливих комбінацій в залежності від точності представлення початкових умов для генератора на основі логістичного відображення та комбінації генераторів (логістичного та лінійного конгруентного)

Таблиця 3

Часові затрати для повного перебору значень параметру керування в межах λ∈ [3,97;4] при кроці 0,01 (для генератора бінарних послідовностей на основі логістичного відображення та на основі комбінації лінійного конгруентного генератора логістичного відображення)

Точність представлення значень параметрів (кількість знаків після коми)	Діапазон значень параметру керування	Простір ключів	Необхідні часові витрати для повного перебору значень вхідних параметрів (в роках)
10	λ =[3,97;4]	$0{,}03 \cdot 10^{20}$	0,095
11	λ =[3,97;4]	$0{,}03 \cdot 10^{22}$	9,52
12	λ =[3,97;4]	$0{,}03 \cdot 10^{24}$	952,3
10	λ =[3,98;4]	$0{,}02 \cdot 10^{20}$	0,063
11	λ =[3,98;4]	$0{,}02 \cdot 10^{22}$	6,34
12	λ =[3,98;4]	$0{,}02 \cdot 10^{24}$	634,92
10	λ =[3,99;4]	$0{,}01 \cdot 10^{20}$	0,0317
11	λ =[3,99;4]	$0{,}01 \cdot 10^{22}$	3,174
12	λ =[3,99;4]	$0{,}01 \cdot 10^{24}$	317,4

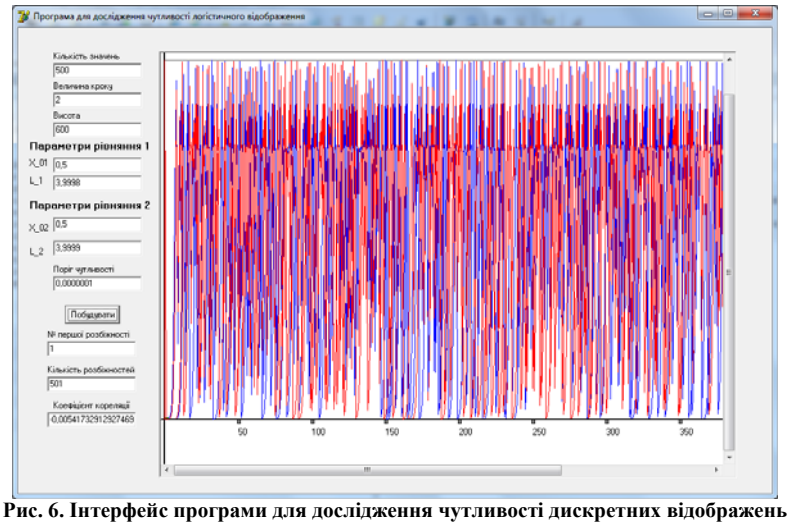


Рис. 6. Інтерфейс програми для дослідження чутливості дискретних відображень

Аналіз криптостійкості генераторів показав, що для повного перебору ключів при точності завдання параметрів керування в 11 знаків після коми необхідно затратити 3,2 років при значеннях параметра керування $\lambda \in [3{,}99;4]$, а при значеннях $\lambda \in [3{,}97;4]$ часові затрати становитимуть 9,5 років.

Дослідження чутливості та кореляції дискретних відображень

Проведемо дослідження логістичного відображення на чутливість по параметру керування λ. Для дослідження чутливості генераторів по вхідним параметрам на мові програмування Delphi 7 було розроблено програмне забезпечення, інтерфейс якого наведений на рис. 6.

Програма дозволяє задавати початкові умови та параметри для 2-х рівнянь: ($x_{(n+1)} = \lambda x_n (1 - x_n)$ – перше рівняння, $y_{(n+1)} = \lambda y_n (1 - y_n)$ – друге рівняння, а також встановлювати поріг чутливості (якщо різниця між значеннями двох рівнянь $x_{(n+1)} - y_{(n+1)}$ більша за даний поріг, то такі значення будуть рахуватись розбіжностями). Для дослідження було обрано 500 значень генерованих послідовностей. За отриманими результатами досліджень було побудовано графіки залежності кількості та номеру першої розбіжності від різниці між значеннями параметрів при різних порогах чутливості, які наведені на рис. 7 та 8, відповідно.

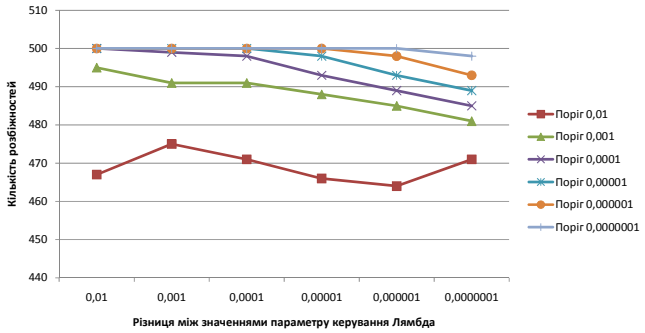


Рис. 7. Залежність кількості розбіжності значень від різниці значень параметрів керування логістичного відображення

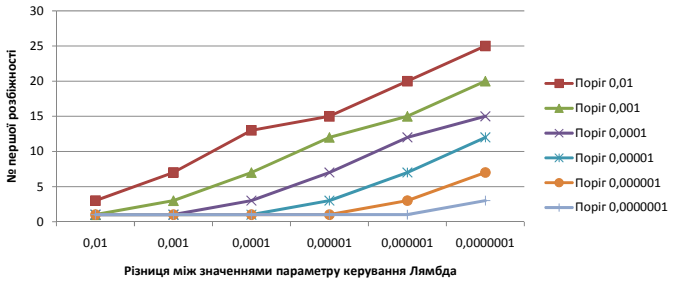


Рис. 8. Залежність номера розбіжності значень від різниці значень параметрів керування логістичного відображення

З проведених досліджень встановлено, що розбіжності в значеннях функції з'являються вже при зміні параметра керування на 0,0000001 при порозі розбіжності 0,0000001

Для більш якісного аналізу проведемо дослідження коефіцієнту кореляції між значеннями функцій $x_{(n+1)}$ та $y_{(n+1)}$. Коефіцієнт кореляції обчислюється за формулою [7–9, 11, 12]:

$$C_p = \frac{N\sum_{j=1}^{N} x_j y_j - \sum_{j=1}^{N} x_j \sum_{j=1}^{N} y_j}{\sqrt{N\left\{\sum_{j=1}^{N} x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{N} x_j\right)^2\right\}}\sqrt{N\left\{\sum_{j=1}^{N} y_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{N} y_j\right)^2\right\}}}, \quad (7)$$

де *x, y, j, i* – значення генерованих послідовностей,

N – значень послідовностей, вибраних для розрахунку коефіцієнту кореляції.

Для розрахунку коефіцієнту кореляції було обрано 500 значень генерованих послідовностей. Дослідження проводилось при наступних значеннях параметрів: $x_0 = y_0 = 0{,}5$; $\lambda_1 = 3{,}9999999999$, $\lambda_2 = 3{,}9999999998$ (графік 1) та $\lambda_1 = \lambda_2 = 3{,}9999999999$; $x_0 == 0{,}5$; $y_0 = 0{,}499999999$ (графік 2). Залежність коефіцієнта кореляції від кількості значень генерованих послідовностей показана на рис. 9.

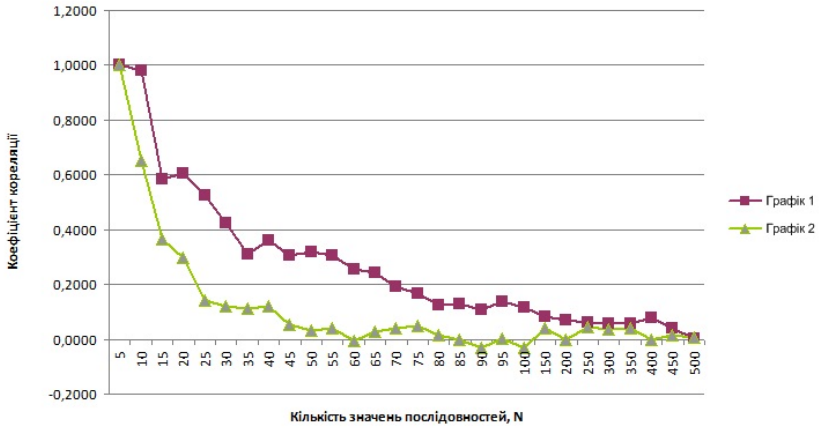


Рис. 9. Графік залежності коефіцієнта кореляції ПВП від кількості генерованих значень

З отриманих результатів можна зробити висновок, що найкращі властивості мають значення послідовностей починаючи з *N*-100 значень.

Застосування генераторів ПВП на основі дискретних відображень у схемах шифрування інформації

На основі розроблених генераторів ПВП та методів кодування інформації нами запропонована система кодування/декодування інформації з її додатковим шифруванням елементами хаотичної послідовності, генерованої на основі дискретних відображень [13]. Система складається з наступних блоків: блок кодування/декодування, блок шифрування/розшифрування, генератор ПВП, блок завдання початкових умов. Структурна схема системи кодування/декодування інформації з її додатковим шифруванням показана на рис. 10.

Запропонована система використовує метод адаптивного арифметичного стиснення з додатковим потоковим шифруванням стиснутої інформації псевдовипадковими послідовностями. Як блок кодування використовується двійковий адаптивний арифметичний кодер.

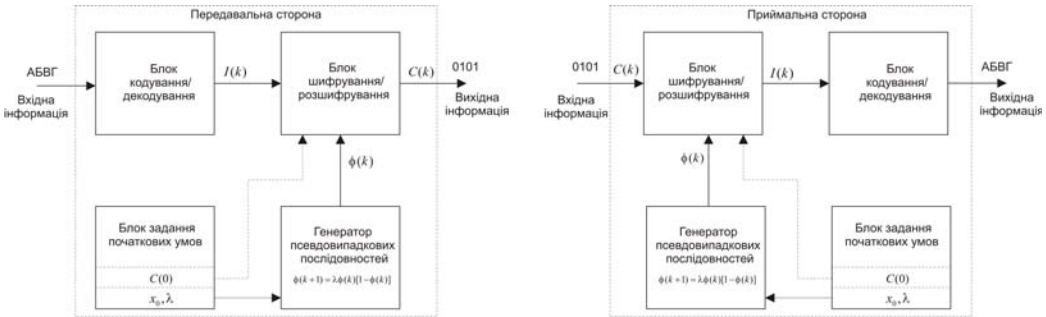


Рис. 10. Структурна схема системи кодування/декодування з додатковим шифруванням

Блоки системи можуть бути реалізовані з використанням апаратно-програмних модулів. Робота системи досліджувалась на прикладі кодування текстової інформації.

Система працює наступним чином. Інформація, що поступає на вхід системи (блоку кодування) на передавальній стороні, кодується та стискується за алгоритмом адаптивного арифметичного кодування, внаслідок чого формується двійкова послідовність (I), що представляє закодовану інформацію. Далі, закодована інформація надходить на вхід блоку шифрування, в якому зашифровується елементами псевдовипадкової послідовності, генерованої на основі логістичного відображення. В якості методу шифрування використовується модифіковане перетворення дифузії, запропоноване в [9]. Дане перетворення зв'язує значення поточних закодованих байтів інформації (тексту) (I_k) з наступними байтами інформації (тексту), отриманими після шифрування (C_k). Механізм дифузії описується наступною формулою:

$$C(k) = \phi(k) \oplus \{[I(k) + \phi(k)] \bmod N\} \oplus I(k-1), \tag{8}$$

де C(k) – байти зашифрованої інформації (тексту), $I(k)$ – байт інформації (тексту), отриманої після стиснення; $I(k-1)$ – попередній байт інформації (тексту), отриманої після стиснення (з виходу блоку кодування) (при k=1 замість $I(k-1)$ беремо відповідне задане нами значення C(0), яке, зокрема, можна вважати додатковим ключем шифрування), $\phi(k)$ – байти псевдовипадкової послідовності, генерованої на основі логістичного відображення:

$$\phi(k+1) = \lambda\phi(k)[1-\phi(k)]. \tag{9}$$

Обернене перетворення дифузії (3.12) перепишеться у наступному вигляді:

$$I(k) = \{\phi(k) \oplus C(k) \oplus I(k-1) + N - \phi(k)\} \bmod N. \tag{10}$$

Таким чином, на виході системи утворюється стиснуте двійкове кодове повідомлення (C), що додатково зашифроване псевдовипадковими послідовностями. Додаткове шифрування унеможливлює розшифрування інформації, якщо не відомий ключ для запуску генератора псевдовипадкової послідовності. Як ключ для генератора на основі логістичного відображення виступають наступні параметри: початкова умова ϕ_0 та значення параметру керування λ (в нашому випадку $\lambda = 3{,}99$). На приймальній стороні розшифрування та декодування інформації здійснюється у зворотному порядку. Для синхронізації передавальної та приймальної сторін системи можна використати спосіб синхронізації, запропонований в [14].

Запропонована система була реалізована на програмному рівні. В таблиці 4 приведений порівняльний аналіз систем кодування інформації з додатковим її шифруванням на основі дискретних відображень.

Таблиця 4

Порівняльний аналіз систем кодування інформації з додатковим шифруванням

Початковий розмір файлу, Кб	Система кодування інформації з додатковим шифруванням в [15,16]		Розроблена система арифметичного кодування з додатковим шифруванням	
	Час кодування, мс	Час декодування, мс	Час кодування, мс	Час декодування, мс
1396	590	631	540	587
1403	560	601	512	565
1428	480	501	443	492

Результати тестування показали, що запропонована система має більшу швидкодію (до 10 %) на відміну від аналогічних систем стиснення та шифрування інформації на основі дискретних відображень [15, 16]. Це зумовлене тим, що в системі, на відміну від аналогів, використовується простий метод шифрування та один генератор ПВП.

Висновки

Проведене дослідження генераторів псевдовипадкових послідовностей на основі дискретних відображень. Тестування статистичних властивостей проводилось з використанням пакету тестів NIST STS 2.1.2. Запропонований генератор псевдовипадкових послідовностей на основі комбінації лінійного конгруентного генератора та генератора на основі логістичного відображення для якого встановлено діапазон значень параметру керування λ при якому послідовності, генеровані запропонованим генератором задовольняють вимогам статистичних тестів. Проведені дослідження чутливості та криптостійкості генераторів псевдовипадкових послідовностей на основі дискретних відображень. Із результатів досліджень випливає наступне:

1. Поєднання генераторів псевдовипадкових послідовностей (лінійного конгруентного генератора та генератора на основі логістичного відображення), дозволяє збільшити діапазон значень параметру керування з $\lambda \in [3{,}99;4]$ (для генератора на основі логістичного відображення) до $\lambda \in [3{,}975;4]$ при якому послідовності, сформовані запропонованим генератором задовольняють вимогам статистичних тестів, що також підвищує криптостійкість генератора.

2. Проведені дослідження чутливості генератора ПВП на основі логістичного відображення до зміни параметру керування показали, що розбіжності в значеннях функції логістичного відображення з'являються вже при зміні параметра керування в десятому знаку при порозі розбіжності 0,00000001. Дослідження коефіцієнту кореляції між значеннями генерованих послідовностей показує, що найкращі властивості мають значення послідовностей починаючи з *N*-100 значень.

3. Проведений криптоаналіз генераторів на основі логістичного відображення з використанням атаки "груба сила", встановив, що для повного перебору ключів (при точності завдання параметрів керування в 11 знаків після коми) необхідно затратити 3,2 роки при значеннях параметра керування $\lambda \in [3{,}99;4]$ (для генератора на основі логістичного відображення), а при значеннях $\lambda \in [3{,}97;4]$ часові затрати становитимуть 9,5 років (для комбінації генераторів).

4. На основі розроблених генераторів ПВП та методів кодування інформації запропонована система кодування (стиснення) інформації з її додатковим шифруванням елементами хаотичної послідовності, генерованої на основі дискретних відображень. Результати тестування показали, що запропонована система має більшу швидкодію (до 10%) на відміну від аналогічних систем.

Література

1. Долгов В.А. Криптографические методы защиты информации : курс лекций / В.А. Долгов, В.В. Анисимов. – Хабаровск : Издательство ДВГУПС, 2008. – 155 с.

2. Kocarev L. Pseudorandom bits generated by chaotic maps / Kocarev L., Jakimoski G // Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEETransactions. – 50(1). – 2003. – P. 123–126.

3. Гресь О.В. Дослідження криптостійкості хаотичних послідовностей генерованих на основі дискретних відображень / О.В. Гресь, Р.Л. Політанський, С.М. Храпко // Інформаційна безпека в сучасному суспільстві : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, 21-22 листопада 2014 р., Львів. – С. 20-21.

4. Kanso A. Logistic chaotic maps for binary numbers generations / A. Kanso, N. Smaoui // Chaos, Solitons & Fractals. – 2009 – Vol. 40(5) – P. 2557–2568.

5. Гресь О. В. Дослідження статистичних характеристик генераторів бінарних послідовностей на

основі хаотичних відображень / О. В. Гресь, Р. Л. Політанський, Л. Ф. Політанський // Захист інформації і безпека інформаційних систем : матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції, 2-3 червня 2016р. : тези доп. – Львів, 2016. – С. 118–119.

6. Гресь О.В. Дослідження криптостійкості генераторів бінарних послідовностей на основі дискретних відображень / О. В. Гресь, Р. Л. Політанський // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних : матеріалиV Міжнародної науково-практичної конференції, 3-5 листопада 2016р. : тези доп. – Чернівці, 2016. – С. 123.

7. Гресь О.В. Шифрування інформації з використанням псевдовипадкових гаусових послідовностей / О.В. Гресь, Р.Л. Політанський, П.М. Шпатар, В.Я. Ляшкевич // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/11(60). – С. 8–10.

8. Гресь О.В. Алгоритм шифрування інформації з використанням псевдовипадкових послідовностей / О.В. Гресь, Р.Л. Політанський, П.М. Шпатар, А.Д. Верига // Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – № 1(25). – С. 88–93.

9. Гресь О.В. Аналіз алгоритмів шифрування інформації на основі дискретнх вдображень / О.В. Гресь, В.М. Косован, М.І Скрипський, Г.М. Розорінов, П.М. Шпатар // Сучасний захист інформації. – 2015. – № 3. – С. 42–48.

10. Горбенко І.Д. Прикладна криптологія: Теорія. Практика. Застосування : монографія / І.Д. Горбенко, Ю.І. Горбенко. – Харків : «Форт», 2012. – 880 с.

11. Болтенков В.А. Анализ алгоритмов хаотического шифрования изображений / Болтенков В.А., Никольский Е.С. // Цифрові технології. – 2010. – № 7. – С. 61–66.

12. PareekN.K. Cryptography using multiple one-dimensional chaotic maps / N.K. Pareek, Vinod Patidar, K.K. Sud // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. – 10(7). – 2005. – P.715–723.

13. Патент 82390, Україна, МПК(2013.01) H03M 7/00, H03M 7/30 (2006.01), H03M 13/07 (2006.01). Система кодування/декодування інформації з шифруванням / Політанський Л.Ф., Політанський Р.Л., Гресь О.В. ; заявник і власник ЧНУ ім. Ю.Федьковича. – № 201205880 ; заявл.14.05.12 ; опубл. 10.01.13, Бюл. № 1.

14. Политанский Р. Л. Система передачи данных с шифрованием хаотическими последовательностями / Р. Л. Политанский, П. М. Шпатарь, А. В. Гресь, А. Д. Верига // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 2-3. – С. 28–32.

15. Bose R. A novel compression and encryption scheme using variable model arithmetic coding and coupled chaotic system / R. Bose, S. Pathak // IEEE transactions on circuits and systems: regular papers. – april 2006. – Vol. 53, NO. 4. – p. 848–857.

16. Wang B. Encrypting the compressed image by chaotic map and arithmetic coding / B. Wang, X. Zheng, S. Zhou, C. Zhou, X. Wei, Q. Zhang, C. Che // Optik. – 2014 . – Vol. 125 – p. 6117–6122

References

1. Dolgov V.A. Kriptograficheskie metodyi zaschityi informatsii. Kurs lektsiy. / V.A.Dolgov, V.V. Anisimov. – Habarovsk.: Izdatelstvo DVGUPS, 2008. – 155 s

2. Kocarev L. Pseudorandom bits generated by chaotic maps /Kocarev L., Jakimoski G //. –Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEETransactions – 50(1) – 2003 – Pp. 123-126.

3. Hres O.V. Doslidzhennia kryptostiikosti khaotychnykh poslidovnostei henerovanykh na osnovi dyskretnykh vidobrazhen/O.V. Hres, R.L. Politanskyi, S.M. Khrapko // Informatsiina bezpeka v suchasnomu suspilstvi Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 21-22 lystopada 2014 r., Lviv, Ukraina – S. 20-21.

4. Kanso A. Logistic chaotic maps for binary numbers generations. / A. Kanso, N. Smaoui // Chaos, Solitons & Fractals. – 2009 – Vol. 40(5) – pp. 2557-2568.

5. Hres O. V. Doslidzhennia statystychnykh kharakterystyk heneratoriv binarnykh poslidovnostei na osnovi khaotychnykh vidobrazhen /O. V. Hres, R. L. Politanskyi, L. F. Politanskyi // Zakhyst informatsii i bezpeka informatsiinykh system: Materialy V Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 2-3 chervnia 2016r.: tezy dop. – Lviv, 2016. – S. 118-119.

6. Hres O.V. Doslidzhennia kryptostiikosti heneratoriv binarnykh poslidovnostei na osnovi dyskretnykh vidobrazhen / Hres O. V., Politanskyi R. L. // Fizyko-tekhnolohichni problemy peredavannia, obrobky ta zberihannia informatsii v infokomunikatsiinykh: MaterialyV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 3-5 lystopada 2016r.: tezy dop. – Chernivtsi, 2016. – S. 123.

7. Hres O.V. Shyfruvannia informatsii z vykorystanniam psevdovypadkovykh hausovykh poslidovnostei / Politanskyi R.L., Shpatar P.M., Hres O.V., Liashkevych V.Ia. // «Vostochno-evropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi». 2012 №6/11(60) S8-10.

8. Hres O.V. Alhorytm shyfruvannia informatsii z vykorystanniam psevdovypadkovykh poslidovnostei / Hres O.V., Politanskyi R.L., Shpatar P.M., Veryha A.D. // Naukovo-vyrobnychyi zbirnyk «Naukovi zapysky ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku». 2013 №1(25) S88-93.

9. Hres O.V. Analiz alhorytmiv shyfruvannia informatsii na osnovi dyskretnkh vdobrazhen / O.V. Hres, V.M. Kosovan, M.I Skrypskyi, H.M. Rozorinov, P.M. Shpatar/ Suchasnyi zakhyst informatsii, №3, 2015, s. 42-48

10. Horbenko I.D. Prykladna kryptolohiia: Teoriia. Praktyka. Zastosuvannia: monohrafiia / I.D. Horbenko, Yu.I. Horbenko. – Kharkiv: «Fort», 2012. – 880 s.

11. Boltenkov V.A. Analiz algoritmov haoticheskogo shifrovaniya izobrazheniy / Boltenkov V.A., Nikolskiy E.S. // TsifrovI tehnologIYi/ # 7 – 2010 – S. 61-66.

12. PareekN.K. Cryptography using multiple one-dimensional chaotic maps / N.K. Pareek, Vinod Patidar, K.K. Sud // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul – 10(7) – 2005 – Pp.715–723.

13. Politanskyi L.F., Politanskyi R.L., Hres O.V. Systema koduvannia/dekoduvannia informatsii z shyfruvanniam. Patent 82390, Ukraina, MPK(2013.01) H03M 7/00, H03M 7/30 (2006.01), H03M 13/07 (2006.01). zaiavnyk i vlasnyk ChNU im. Yu.Fedkovycha - №201205880; zaiavl.14.05.12; opubl. 10.01.13, Biul. №1

14. Politanskiy R. L. Sistema peredachi dannyih s shifrovaniem haoticheskimi posledovatelnostyami / Politanskiy R. L., Shpatar P. M., Gres A. V., Veriga A. D. // Tehnologiya i konstruirovanie v elektronnoy apparature. – 2014. – #2-3. – S. 28-32.

15. Bose R. A novel compression and encryption scheme using variable model arithmetic coding and coupled chaotic system / R. Bose, S. Pathak // IEEE transactions on circuits and systems—i: regular papers, . – april 2006 – Vol. 53, NO. 4 . – pp. 848-857

16. Wang B. Encrypting the compressed image by chaotic map and arithmetic coding / B. Wang, X. Zheng, S. Zhou, C. Zhou, X. Wei, Q. Zhang, C. Che // Optik. – 2014 . – Vol. 125 – pp. 6117–6122

Рецензія/Peer review : 27.06.2017 р. Надрукована/Printed :01.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., доц. Любчик В.Р.

УДК 004:519.816:614.4.

С.В. ЯКУБОВСЬКА, Д.М. БАРАНОВСЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет

ПІДСИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЛІКАРЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКУ ІНФАРКТУ МІОКАРДА

Сучасна інформаційна медична система має функцію підтримки прийняття рішень лікарем, яка реалізується за допомогою спеціалізованих технічних засобів та відповідних обчислювальних алгоритмів. Своєчасне застосування рішень і рекомендацій, отримане за допомогою системи підтримки прийняття рішень, запобігає появі ускладнень у стані пацієнта. Реалізація зазначеного рішення досягнута шляхом розроблення і доповнення базової схеми автоматизованої системи підсистемою підтримки прийняття рішень. Розв'язано задачу отримання рішення з урахуванням можливих ризиків хворих.

Ключові слова: інфаркт міокарда, інформаційна медична система, підтримка прийняття рішень.

S. V. YAKUBOVSKA, D. M. BARANOVSKIY
Vinnytsa National Technical University

SUPPORT FOR ADOPTION OF SOLUTIONS FOR A MEDICINE FOR THE AUTOMATED SYSTEM OF MYOCARDIAL INFECTION RISK DETERMINATION

The modern informational medical system has the function of supporting decision-making by the doctor, which is realized with the help of specialized technical means and corresponding computational algorithms. The timely application of decisions and recommendations obtained through the decision support system prevents the occurrence of complications in the patient's condition. The implementation of this solution is achieved by developing and supplementing the basic scheme of the automated system by the subsystem of decision support. The system verifies in the patient the presence of known clinical manifestations of critical states, which are stored in the appropriate knowledge base and are expressed by sets of clinical signs for each of the possible diagnoses. Having received the appropriate set of signs, the system builds one or more hypotheses of the situation. Further testing of the hypothesis indicates that, if confirmed, the CRP system should formulate recommendations for the prevention or elimination of the risks it has identified. The task of obtaining a multi-criteria solution, taking into account the possible risks of patients, was solved.

Keywords: myocardial infarction, informational medical system, support of decision making.

Вступ

Однією із базових функцій, що характеризують сучасну інформаційну медичну систему є функція підтримки прийняття рішень лікарем, яка реалізується за допомогою спеціалізованих технічних засобів та відповідних обчислювальних алгоритмів. Особливого значення вона набуває, коли необхідно забезпечити прогноз розвитку того чи іншого захворювання, особливо в умовах дії негативних факторів ризику, зумовлених як зовнішніми, так і внутрішніми чинниками.

Своєчасне застосування рішень і рекомендацій, отримане за допомогою системи підтримки прийняття рішень (СППР) запобігає появі ускладнень у стані пацієнта, забезпечує своєчасне застосування лікарських засобів, реабілітаційних процедур і профілактичних заходів тощо.

Мета роботи – підвищення достовірності прийнятого рішення щодо діагнозу, вибору тактики лікування та формування прогнозу результату і розвитку інфаркту міокарда на фоні можливих негативних ризиків, що впливають на якість лікувально-діагностичного і реабілітаційного процесу хворих з інфарктом міокарда.

Мета роботи досягається розробленням відповідної підсистеми підтримки прийняття рішень та введенням її до структури сучасної автоматизованої системи визначення ризику інфаркта міокарда.

Аналіз літературних джерел

Існує достатньо велика кількість визначень СППР (ППППР), що відображають практично всі етапи їх розвитку, здобутки відповідних наукових шкіл, особливості предметної області та діапазону «ОПР-комп'ютер» тощо. Їх діапазон розповсюджується на СППР, що засновані «на використанні моделі сукупності процедур по обробленню даних і рішень … » [1], включає в себе СППР, які визначаються як «комп'ютерні інформаційні системи для прийняття рішень в ситуаціях, де неможливо або небажано мати автоматичну систему, яка повністю виконує процес прийняття рішень» [2] і закінчується, так званими, адаптивними та інтелектуальними СППР, побудованими з використанням модельного проектування [3] і прототипу [4], коли розробником створюється макет (прототип) системи з бажаними функціями і характеристиками, який в результаті подальшої спільної роботи розробника, користувача та особи, що здійснює технічний супровід, приймає вигляд функціонально завершеної структури [5]. В класичному розумінні СППР не виконує самостійно будь-яких рішень а тільки дає підказку особі, що приймає рішення або надає йому оброблені відповідним алгоритмом дані [6]. За рівнем «інтелектуальності» оброблених даних в сучасних СППР виділяють три основних класи [9]: інформаційно-пошукові, оперативно-аналітичні та інтелектуальні. В останні роки, завдяки розвитку предметної області досліджень, що проводяться в медицині найбільше розповсюдження отримали саме інтелектуальні СППР. Фактично, увібрали в себе ту специфіку та особливості проектування, які характерні інформаційно-пошуковим та оперативно-аналітичним СППР. В роботі [8] розроблено автоматизовану систему для реєстрації, оброблення та аналізу

діагностично цінної, спеціалізованої інформації щодо пацієнтів з інфарктом міокарда (ІМ). Важливою функцією якої є формування прогнозу стану хворого з ІМ в найближчому та віддаленому періодах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Результати апробації та проведених клінічних досліджень показали, що представлена автоматизована система може бути удосконалена та отримати нові функції, і перш за все, це підтримку прийняття рішень та функцію прогнозування розвитку ІМ на фоні можливих факторів ризику. Таке удосконалення здійснюється шляхом зміни її структури і зв'язків між блоками, введенням підсистеми прийняття рішення та інших блоків, що забезпечать системі нові функції – якість і достовірність отриманих результатів.

Пропоноване рішення сприяє суттєвому зменшенню кількості лікарських помилок при дотримуванні: а) рішення щодо основного діагнозу; б) рішення щодо прогнозу розвитку стану хворого після перенесеного інфаркту; в) пропозицій щодо формування рекомендацій по попередженню або усуненню можливих ризиків, які супроводжують процес лікування і реабілітації хворого з ІМ.

Реалізація зазначеного рішення досягнута шляхом розроблення і доповнення базової схеми автоматизованої системи підсистемою підтримки прийняття рішень, структурна схема якої представлена на рис. 1.

До складу розробленої ППР лікаря-кардіолога входять: блок вводу фізіологічних даних (БВФД); блок обміну даними (БОД); бази даних (БД1-БД6); проміжне та основне сховище даних (ПСХ) і (ОСД); валідатори 1÷3; база знань ППР (БЗ ППР); база знань експертів (БЗЕ); блоки прийняття рішень (БПР), перевірки рішень на адекватність (БПРА), формування прогнозу (БФП), формування рекомендацій по попередженню ризиків (БФРПР), АРМ лікаря (ОПР). Обмін даними та керуючою інформацією здійснюється через внутрішню двонаправлену магістраль даних (МДЗ).

Відмінністю розробленої ППР є використання з метою підвищення достовірності як діагнозу і прогнозу розвитку ІМ , так і рекомендацій, валідаторів 1-3.

Валідатори 1, 2 представляють собою пристрої для перевірки даних, представлених в цифровій формі на електронних носіях і в каналах передачі даних. Валідатор 3 являє собою функціонально завершену програму, яка здійснює перевірку відповідності даних визначеному формату, що особливо важливо на етапі прийняття рішення.

БД 1 – база даних по медичних препаратах, яка включає назву, показання і протипоказання, чутливість (переносимість), сумісність з іншими ліками, особливості застосування тощо;

БД 2 – база даних середньостатистичної норми фізіологічних і біохімічних даних хворих, що перенесли ІМ;

БД 3 – база анамнестичних даних пацієнтів, що обслуговувалися даною системою.

БД 4 – база даних про фізичні ризики, які впливають на результат лікування і подальший розвиток ІМ та які мають місце при виборі тактики лікування;

БД 5 – база даних про фізичні ризики, які впливають на розвиток ІМ після проведеної медикаментозної терапії;

БД 6 – база даних фізичних ризиків, які впливають на достовірність прогнозування розвитку ІМ.

Розроблена структура ППР призначена для визначення адекватного рішення і формування основного прогнозу на фоні можливих фізичних ризиків виникнення критичних ситуацій (етапів). Система додатково до базових функцій, пов'язаних з прийняттям рішень, фактично попереджає лікаря щодо наявності або можливості виникнення критичного стану шляхом перевірки характеристик стану пацієнта на присутність в них клінічних проявів критичних станів. Останні зберігаються у відповідних базах даних і знань і мають визначений для кожного із можливих критичних станів набір клінічних ознак [7].

Управління проміжними та основним сховищами даних має комплексний характер, при якому основне управління здійснюється СУБД 1, СУБД 2 типу MySQL, а розширення функцій MySQL досягається за допомогою елементів OLAP технологій [10], що свідчить про функціональну завершеність оперативно-аналітичної частини СППР. Такий підхід дозволяє отримати відповідний функціонал роботи СППР, який за аналогією з [6] може мати таку послідовність:

1) збір необхідної інформації із різних джерел (блоку ввода фізіологічних даних; блоку обміну даних; баз даних; особою, що приймає рішення) тощо;

2) перевірка на достовірність та перетворення в заданий єдиний формат даних;

3) формування запитів до проміжних та основного сховищ даних, баз знань, пошук та структуризація отриманої інформації, формування і представлення інформації в зручному для подальшої роботи та оброблення вигляді;

4) адміністрування СППР, в т. ч. і налагодження даних і метаданих системи, управління правами доступу тощо;

5) вибір, в залежності від фактичного стану пацієнта, оптимального рішення із множини можливих альтернатив щодо діагнозу, тактики лікування і прогнозування розвитку ІМ;

6) прийняття остаточного рішення і прогнозу щодо діагнозу, тактики лікування і розвитку ІМ та формування рекомендацій по попередженню виникнення можливих факторів ризику.

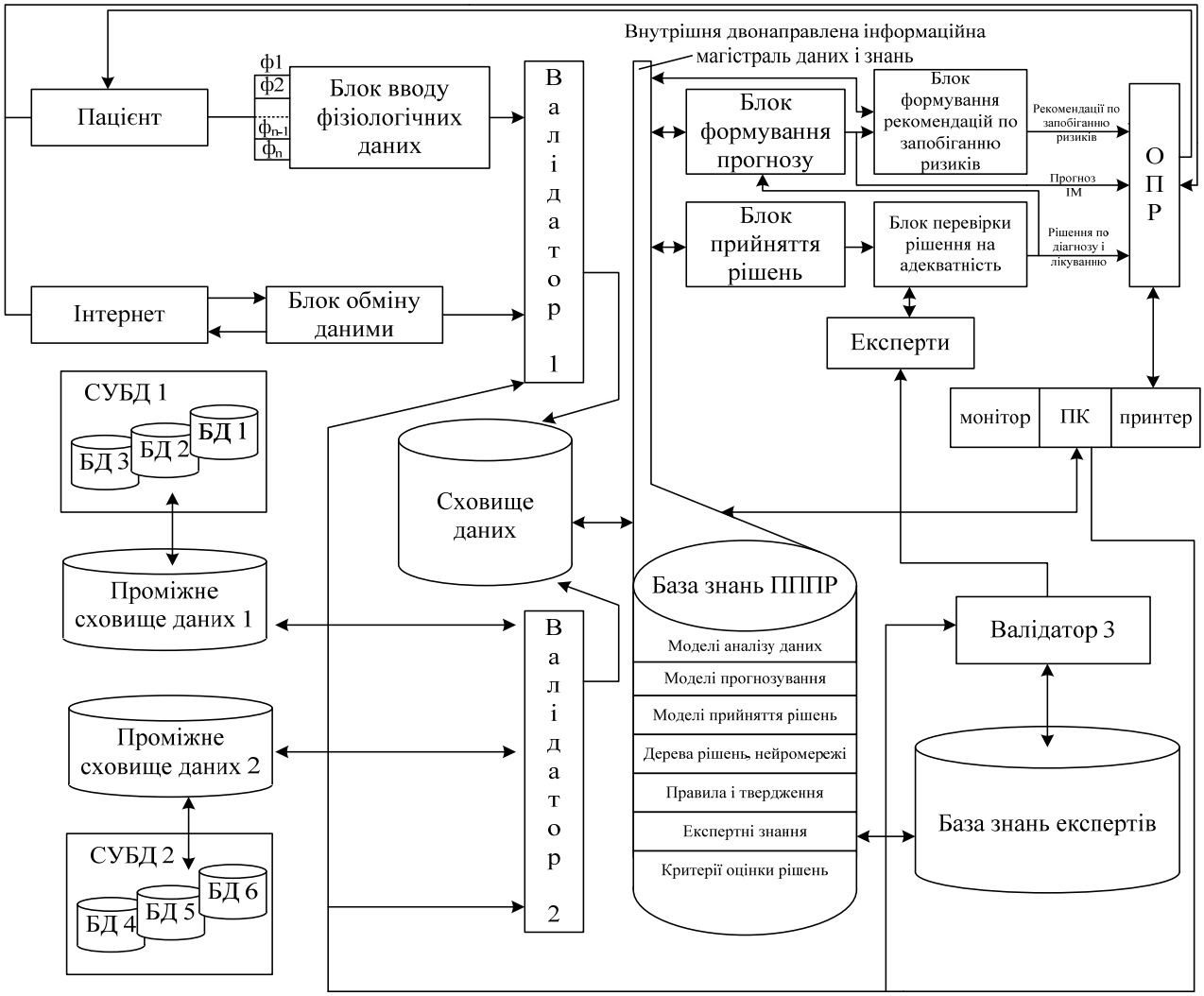


Рис. 1. Підсистема підтримки прийняття рішень

В продовження останнього система перевіряє у пацієнта наявність відомих клінічних проявів критичних станів, які зберігаються у відповідній базі знань і відображаються наборами клінічних ознак для кожного із можливих діагнозів. Отримавши відповідну множину ознак, система, за аналогією з [6], будує одну або декілька гіпотез (сценаріїв) розвитку ситуації, що виникла. Подальша перевірка гіпотези свідчить про те, що в разі її підтвердження система ППР повинна сформувати рекомендації щодо попередження або усунення ризиків, які вона визначила.

Висновок: таким чином, розробленням системи підтримки прийняття рішень для автоматизованої системи визначення результату інфаркту міокарда було вирішено задачу прийняття рішень щодо вибору тактики лікування відповідно до поставленого діагнозу та його перевірки на адекватність фактичному стану пацієнта, формування прогнозу результату і подальшого розвитку інфаркту міокарда та рекомендацій по попередженню або усуненню можливих ризиків.

Фактично було вирішено задачу отримання багатокритеріального рішення з урахуванням можливих ризиків на всіх стадіях лікувально-діагностичного і реабілітаційного процесів хворих з інфарктом міокарда.

Література

1. Little I. D. C. Models and Managers: The Concept of Decision Calculus // Management Scince. – 1970. – 16, № 8. – p. B466–B485.

2. Ginzberg M. J., Stohr E. A. Decision Support Systems: Issues and perspectives // Processes and Tools for Decision Support / Ed. By H. G. Sol. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co. 1983. – p. 9–31.

3. Keen P. G. W. Decision Support Systems: A. Research Perspective // Knowledge Representation for Decision Support Systems / Ed. By L. B. Methlie and R. H. Sprague. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co. 1985. – p. 23–44.

4. Henderson I. C., Inqreham R. S., Prototyping for DSS: A Critical Appraisal // Processes and Tools for Decision Support / Ed. By H. G. Sol. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co. 1983. – p. 79–95.

5. Ларичев О. И. Системы поддержки принятия решений: современное состояние и перспективы развития / О. И. Ларичев, А. Б. Петровский // Итоги науки и техники. – М. : ВИНИТИ, 1987. – Т. 21. – С.

131–146.

6. Архитектуры систем поддержки принятия решений / [Кмогко В. И., Шулков Е. А., Власенко А. В., Карнизья Р. О.] [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://ej/rubagro.ru/2013/02/pdf/49.pdf

7. Найдаков И. А. Система піддержки принятия решений для предупреждения рисков возникновений критических ситуаций / И. А. Найдаков // Альманах современной науки и образования. – Тамбов : «Грамота», 2015. – № 8(98). – С. 92–95.

8. Якубовская С. В. Автоматизированная система исхода Инфаркта миокарда / В. С. Якубовская, В. В. Никонов, А. П. Порван, А. И. Довхарь, Е. И. Чипеик // Вісник національного технічного університету, Вісник ХПІ. Серія «Механіко-технологічні комплекси та системи». – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 49. – С. 58–62.

9. Методы и модели анализа данных: OLAP Data – mining / [Барсяган А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В. И др.]. – СПб : БХВ-Петербург, 2014. – 336 с.

10. Kostishyn S. V., Tymchyk S. V., Bachinskiy M. V., Fedosova I. V. Ways and possibilities of creating medical information systems Based on olap-technology.

References

1. Little I. D. C. Models and Managers: The Concept of Decision Calculus // Management Scince. – 1970. – 16, № 8. – p. B466–B485.

2. Ginzberg M. J., Stohr E. A. Decision Support Systems: Issues and perspectives // Processes and Tools for Decision Support / Ed. By H. G. Sol. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co. 1983. – p. 9–31.

3. Keen P. G. W. Decision Support Systems: A. Research Perspective // Knowledge Representation for Decision Support Systems / Ed. By L. B. Methlie and R. H. Sprague. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co. 1985. – p. 23–44.

4. Henderson I. C., Inqreham R. S., Prototyping for DSS: A Critical Appraisal // Processes and Tools for Decision Support / Ed. By H. G. Sol. – Amsterdam: North-Holland Publ. Co. 1983. – p. 79–95.

5. Larychev O. Y. Systemы podderzhky pryniatyia reshenyi: sovremennoe sostoianye y perspektyvы razvytyia / O. Y. Larychev, A. B. Petrovskyi // Ytohy nauky y tekhnyky. – M. : VYNYTY, 1987. – T. 21. – S. 131–146.

6. Arkhytekturы system podderzhky pryniatyia reshenyi / [Kmohko V. Y., Shulkov E. A., Vlasenko A. V., Karnyzia R. O.] [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://ej/rubagro.ru/2013/02/pdf/49.pdf

7. Naidakov Y. A. Systema pidderzhky pryniatyia reshenyi dlia preduprezhdenyia ryskov voznyknovenyi krytycheskykh sytuatsyi / Y. A. Naidakov // Almanakh sovremennoi nauky y obrazovanyia. – Tambov : «Hramota», 2015. – # 8(98). – S. 92–95.

8. Yakubovskaia S. V. Avtomatyzyrovannaia systema yskhoda Ynfarkta myokarda / V. S. Yakubovskaia, V. V. Nykonov, A. P. Porvan, A. Y. Dovkhar, E. Y. Chypeyk // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, Visnyk KhPI. Seriia «Mekhaniko-tekhnolohichni kompleksy ta systemy». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – # 49. – S. 58–62.

9. Metodы y modely analyza dannыkh: OLAP Data – mining / [Barsiahan A. A., Kupryianov M. S., Stepanenko V. V. Y dr.]. – SPb : BKhV-Peterburh, 2014. – 336 s.

10. Kostishyn S. V., Tymchyk S. V., Bachinskiy M. V., Fedosova I. V. Ways and possibilities of creating medical information systems Based on olap-technology.

Рецензія/Peer review : 06.07.2017 р. Надрукована/Printed :05.09.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кичак В.М.

УДК 621.3.095.21:621.3.018

К.Л. ГОРЯЩЕНКО, І.В. ГУЛА
Хмельницький національний університет

ЗАКОНОДАВЧА БАЗА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРАЖАМИ

Керування телекомунікаційними мережами вимагає застосування окремої структури, яка виконує операції з контролю стану, вимірювань, здатна керувати операціями ремонту та відновлення, а також забезпечувати резервування та облік. Системою, що забезпечує такі функції відноситься мережа керування телекомунікаційними лініями – TMN. В статті показана структура системи технічної експлуатації у складі системи управління. Показано склад та призначення основних елементів TMN. Показано, що областю застосування TMN є як проводові системи зв'язку так і волоконно-оптичні лінії. Важлвивий вузел TMN – модуль управління усунення відмов, в якому вирішуються завдання контролю за станом мережі і її елементів в реальному часі, виявлення і локалізації пошкоджень, відновлення трафіку, оперативного перестроювання мережі, усунення пошкоджень, сповіщення користувачів про роботи, що проводяться. Виявлення пошкоджень в ідеології TMN є невід'ємним процесом від процесу надання послуг з керування телекомунікаційною мережею. Незважаючи на те, що TMN створена з теорії, основні засади побудови TMN є прийнятними для створення практичних реалізацій.

Ключові слова: мережа, керування, телекомунікаційна мережа.

K.L. HORIASHCHENKO, I.V. GULA
Khmelnitsky national university

LEGISLATIVE BASIS OF TELECOMMUNICATION CONTROL TECHNOLOGY APPLICATIONS

Telecommunication network management requires the use of a separate structure that performs state-of-the-art operations, measurements, is able to manage repair and restoration operations, and provide backup and accounting. The system providing such functions is the network of telecommunication control - TMN. The article shows the structure of the system of technical exploitation as part of the control system. The composition and purpose of the main elements of TMN are shown. It is shown that the scope of TMN is both wired communication systems and fiber-optic lines. An important node of TMN is a failure control management module, which solves the problems of monitoring the status of the network and its elements in real time, detecting and locating damage, recovering traffic, operative network rebuilding, eliminating damage, alerting users about the work being carried out. Detection of damage in the ideology of TMN is an integral process from the process of providing telecommunication network management services. Despite the fact that TMN is created from the theory, the basic principles of constructing TMN are acceptable for the creation of practical implementations.

Keywords: network, management, telecommunication network.

Вступ

Мережі зв'язки, що є сукупністю вузлів і ліній між ними, призначені для перенесення (транспортування) повідомлень у вигляді електричних сигналів від джерела повідомлень до одержувача. Для реалізації послуг зв'язку недостатньо створити оптимально побудовані мережі зв'язку і відповідне устаткування. Необхідне створення допоміжних служб, систем, надбудов над мережею зв'язку, які в умовах запитів споживачів, кількість яких зростає, забезпечили б її стійке функціонування протягом всього терміну служби апаратури і зовнішніх дестабілізуючих дій.

До таких надбудов відносяться системи технічної експлуатації, нумерації, тарифікації, розрахунків за послуги зв'язку і ряд інших. Повний перелік систем залежить від конкретного виду мережі зв'язку (первинна, вторинна і так далі). Сукупність цих систем підтримує мережа електрозв'язку, забезпечуючи її функціонування і необхідний рівень показників для задоволення вимог споживачів. Перераховані "системи підтримки" об'єднуються загальним поняттям – система управління, яка нерозривно, в замкнутому контурі із зворотним зв'язком, взаємодіє з мережею електрозв'язку через обумовлені інтерфейси. Інтерфейси є пристрою (програмно-апаратні засоби) для узгодження технічних засобів системи управління, системи технічної експлуатації і мережі зв'язку.

Постановка завдання

В цілому, мережу електрозв'язку можна розглядати як кібернетичну систему, яка включає об'єкт управління ОУ (керована підсистема) і системи управління СУ (підсистема керування), зв'язаних між собою потоками контрольної інформації, що управляє, і що піддаються зовнішній дії. При цьому зовнішніми по відношенню до мережі діями є як плани і директиви, що поступають від вищестоящих організацій (з верхніх рівнів управління) і вимоги по доставці повідомлень і наданню інших послуг, поступають від користувачів, так і різні дії або відмови (несправності) окремих елементів, що порушують хід процесу.

У галузі зв'язку роль управління в розвитку і вдосконаленні мереж значно підвищується. Якщо раніше управління розумілося як складова частина технічної експлуатації разом з технічним обслуговуванням, то в даний час управління розглядається як ширше поняття, що включає технічну експлуатацію як важливу складову частину всього процесу забезпечення якості функціонування лінії.

При такому підході технічну експлуатацію слід розуміти як виконавчу складову системи управління, яка засобами технічного обслуговування забезпечує в мережі зв'язку виконання тих рішень і команд, які прийняті системою управління, і повідомляє про результати їх виконання.

Іншими словами, в системі управління можна виділити дві основні частини – система ухвалення рішень і система виконання рішень. Перша – це мозок системи, її інтелектуальна основа, яка реалізується у вигляді операційної системи. Друга, користуючись аналогією з живими організмами, – опорно-руховий механізм системи, який реалізується у вигляді програмно-технічних засобів технічної експлуатації.

Таким чином забезпечення надійності функціонування мережі базується на впровадженні сучасних технічних засобів, однією з функцій яких має бути виконання процедур щодо визначення фізичного стану лінії зв’язку – застосуванні систем технічної експлуатації.

Системи технічної експлуатації як важлививй модуль контролю керування

У системі технічної експлуатації виділяють ряд підсистем, таких як підсистема контролю, вимірювань і резервування, розрахунків і ін. (Рис. 1).

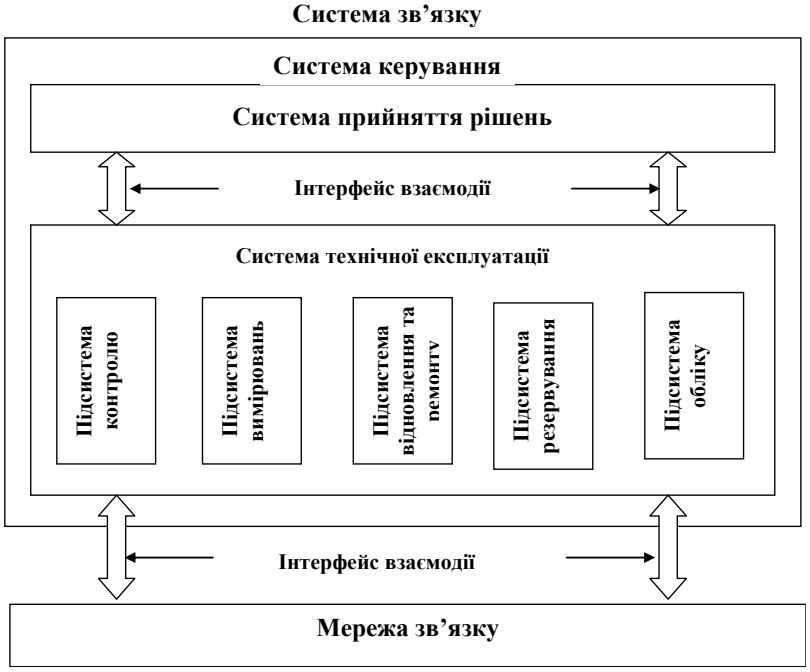


Рис. 1 – Система технічної експлуатації у складі системи управління [1, 2, 3]

Як видно з рис.1, до складу системи технічної експлуатації входять наступні підсистеми:

1) Підсистема контролю повинна забезпечувати контроль зміни стану мережі і її компонентів в реальному масштабі часу для виявлення і локалізації несправностей з метою їх усунення і крізний контроль.

Підсистема контролю підрозділяється на підсистему контролю первинної мережі і підсистему контролю вторинної мережі загального користування (ЗК), що включає наскрізний контроль.

2) Підсистема вимірювань повинна здійснювати реалізацію завдань управління якістю. Підсистема вимірювань призначена для експлуатаційних вимірювань трактів, каналів і апаратури зв'язку з метою оцінки показників і параметрів використовуваних технічних засобів. Вимірювання проводяться, як правило, в процесі виконання різних функцій технічного обслуговування: настройки; паспортизації; перевірки працездатності трактів і технічних засобів під час їх дії; визначення причини і місця пошкодження; ремонту несправних блоків.

3) Підсистема відновлення і ремонту технічних засобів. При цьому підсистема відновлення повинна здійснювати управління усуненням відмов і забезпечувати працездатність устаткування, апаратури і ліній передачі при заданій якості і надійності з метою надання послуг зв'язку з найбільшою ефективністю, зменшення простоїв і оптимального використання засобів зв'язку, отримання максимального прибутку при мінімальних витратах.

Підсистема ремонту вирішує завдання забезпечення надійної роботи мережі зв'язку, відновлення ресурсу засобів зв'язку при зниженні вартості експлуатаційних витрат.

4) Підсистема резервування здійснює реалізацію завдань управління конфігурацією мережі або її складових частин. Підсистема резервування призначена:

- для досягнення необхідних показників надійності у разі неможливості або економічної недоцільності досягнення цих показників шляхом підвищення надійності окремих елементів засобів зв'язку;
- підвищення показників надійності виділених служб (послуг) електрозв'язку;
- отримання додаткового прибутку за рахунок скорочення тривалості простоїв трактів і каналів передачі.

Підсистема розрахунків повинна здійснювати реалізацію завдань управління розрахунками і призначається для проведення розрахунково-платіжних операцій з користувачами за послуги електрозв'язку, що надаються, з боку підприємств зв'язку (виконавців послуг) всіх форм власності.

Концепція побудови мережі управління телекомунікаціями – TMN

TMN (Telecommunications Management Network) – Мережа Управління Телекомунікаціями. TMN – це по суті міжнародний стандарт, що визначає технологію побудови систем управління телекомунікаційними мережами і що визначає всі аспекти їх функціонування. Слід зазначити, що TMN – технологія, що прийшла "зверху", тобто вона спочатку була задумана на папері, а вже потім почала реалізовуватися на практиці. Офіційно народженням TMN можна вважати 1988 рік, коли МККТТ (нині МСЕ) опублікував першу (і основну) рекомендацію М.3010 "Принципи TMN" [2, 4, 5].

У 1992 році до додатку М.3010 була випущена ціла серія рекомендацій (М.3100, М.3200, М.3300, М.3400 і ін.), які детально описували основні аспекти TMN, згадані в М.3010. Тому 1992 рік можна по праву вважати роком народження TMN не тільки як загальній концепції, але як телекомунікаційну технологію. До 2000 року МСЕ випускав різні додаткові рекомендації, які все більше деталізували TMN, вносили роз'яснення і поправки до базових документів, згаданих вище.

Склад і призначення основних елементів TMN

Згідно рекомендаціям МСЕ-Т М.3010, TMN є самостійною мережею, яка сполучена з мережею

електрозв'язку [6, 7]. Архітектура і принципи побудови TMN забезпечують реалізацію завдань по управлінню, оперативному контролю і експлуатації різнорідного телекомунікаційного устаткування і систем електрозв'язку, які виготовлені різними фірмами-виробниками [8]. TMN призначена для управління послугами мереж зв'язку, для експлуатації і технічного обслуговування устаткування, для оперативно-технічного контролю і адміністрування мережевими пристроями в цілях забезпечення якості надання послуг зв'язку.

Об'єктами управління TMN є телекомунікаційні ресурси. Телекомунікаційні ресурси управління фізично є реальним устаткуванням зв'язку – функціональні блоки, модулі, на певних властивостях яких можна здійснювати цілеспрямовану дію керування. Наприклад, можна забороняти організацію обхідних напрямів зв'язку через певний вузол зв'язку або підвищувати рівень допустимих втрат у напрямі зв'язку.

TMN надає операторові зв'язку послуги з управління мережами електрозв'язку (management service). Послуги управління визначаються як компоненти, пропоновані TMN для задоволення потреб оператора в мережевому управлінні. Сама елементарна з цих компонентів, наприклад генерація повідомлень про несправність, визначається як функція управління (management function). TMN надає операторові зв'язку широкий набір функцій управління телекомунікаційними мережами і послугами, забезпечуючи обмін інформацією в процесі управління. Обмін інформацією передбачає, перш за все, видачу команд управління, отримання підтвердження отримання команд, їх виконання і передачу в систему управління результатів виконання команд.

Мінімальні можливості TMN забезпечують одиничне з'єднання між системою керування, робочою станцією і окремим пристроєм електрозв'язку [2]. У максимальній конфігурації TMN є технічно складною мережею, яка об'єднує в єдиний комплекс управління значне число різних систем і засобів електрозв'язку, використовуючи при цьому декілька типів систем, що управляють, з урахуванням територіальної віддаленості об'єктів управління один від одного. При цьому в TMN враховується, що мережа електрозв'язку складається з багатьох типів аналогового і цифрового устаткування [6, 7], зокрема, систем передачі SDH, PDH, електронних АТС, сигнальних пунктів системи загальноканальної сигналізації (ОКС) №7, устаткування для надання телематических послуг, серверів доступу в Інтернет, маршрутизаторів і комутаторів мереж передачі даних. По стандартах TMN таке устаткування зазвичай називається елементом мережі, або мережевим елементом (Network Element, NE).

Область застосування TMN

Розглянемо приклади мереж, послуг електрозв'язку, основних типів апаратури і систем, управління якими може здійснюватися по мережі TMN [4, 8]:

- мережі загального і приватного користування, включаючи: вузькосмугову і широкосмугову мережі ЦСИС;
- мережі рухомого зв'язку;
- приватні телефонні мережі;
- віртуальні приватні мережі;
- інтелектуальні мережі, управління самою мережею TMN;
- термінали передачі (мультиплексори, устаткування кросової комутації, апаратура перетворення каналу і так далі);
- цифрові і аналогові системи передачі (кабельні, волоконно-оптичні, радіо, супутникові і так далі);
- операційні системи і їх периферія;
- центральні і інтерфейсні процесори, кластерні контроллери, файлові процесори і пр.;
- цифрові і аналогові системи комутації;
- локальні комп'ютерні мережі (WAN, MAN, LAN);
- мережі з пакетною комутацією;
- термінали і системи сигналізації (STP) і бази даних реального масштабу часу;
- послуги перенесення і електрозв'язку;
- УАТС, доступи УАТС і термінали користувачів (абонентів);
- термінали користувачів мережі ЦСИС;
- програмні засоби, забезпечувані послугами електрозв'язки;
- прикладне програмне забезпечення в рамках центральних процесорів і др.;
- взаємодіючі допоміжні системи (випробувальні модулі, системи електроживлення, кондиціонери, системи аварійної сигналізації усередині будівлі і ін.).

Крім того, мережу TMN можна використовувати для управління розподіленими об'єктами і послугами, що надаються при об'єднанні вищеперелічених пунктів.

Таким чином, мережа TMN є інструментом керування широкого спектру телекомунікаційних мереж як проводових низькочастотних, проводових високочастотних так і волоконно-оптичними мережами.

Функціональні групи завдань управління

У розроблених рекомендаціях сектора телекомунікацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку (МСЕ-Т) в TMN завдання системи управління визначені з наступних функціональних напрямах [9, 6, 7, 8]:

- управління конфігурацією мережі;
- управління усуненням відмов;
- управління якістю;

- управління розрахунками;
- управління захистом інформації.

В **управлінні конфігурацією** вирішуються завдання формування і розвитку мережі, створення і супровід плану нумерації мережі, реконфігурація мережі і окремих її елементів (маршрутизаторів, мультиплексорів, побудова карти мережі і так далі), планування послуг, ведення банку даних.

В **управлінні усуненням відмов** вирішуються завдання контролю за станом мережі і її елементів в реальному часі, виявлення і локалізації пошкоджень, відновлення трафіку, оперативного перестроювання мережі, усунення пошкоджень, сповіщення користувачів про роботи, що проводяться.

Виявлення пошкоджень в ідеології TMN є невід'ємним процесом від процесу надання послуг з керування телекомунікаційною мережею [6, 7]. Вимагається постійне або періодичне надання послуг з аналізу телекомунікаційної мережі та стану її роботи. Причому під виявленням пошкоджень розуміється як виявлення проблем пов'язаних із логічним рівнем функціонування – помилки передачі в наслідок колізій, так і виявлення проблем в наслідок фізичного руйнування середовища передачі інформації.

В **управлінні якістю** вирішені завдання збору і аналізу статистичних даних по функціонуванню мереж і їх елементів, регулювання трафіку, розширення діапазону послуг зв'язку, а також завдання розробки, висновку і контролю за виконання угод про рівень якості наданих послуг.

В **управлінні розрахунками** вирішуються завдання збору даних по засобах, що надаються, і послугах зв'язку, розробки тарифів за засоби, що надаються, і послуги, проведення взаємозаліків між учасниками надання послуг, технічних розрахунків, що стосуються можливостей мереж, реєстрації і обліку абонентів.

В **управлінні захистом інформації** (безпекою зв'язку) вирішуються завдання розробки мерів по забезпеченню закритості інформації і контролю за їх здійсненням, захисту баз даних від зловмисного доступу, мерів технічної безпеки і охорони об'єктів зв'язку, складання звітів про спроби несанкціонованого доступу до послуг, захисту цілісності і збереження даних.

Архітектура TMN володіє рядом характеристик, що відрізняють її від основних конкурентів – SNMP-продуктов і фірмових систем управління, заснованих на приватних стандартах. Найбільш значущими з них є:

- можливість інтеграції різнорідних мереж за рахунок комплексної стандартизації великого числа аспектів поведінки і структури системи управління, а також через міжнародний характер стандартів TMN;
- високий ступінь масштабованості рішень завдяки наявності відповідних властивостей базового протоколу взаємодії агентів і менеджерів – протоколу CMIP;
- наявність в архітектурі спеціальних елементів для побудови великих розподілених систем: проміжної мережі передачі даних, засобів маршрутизації і фільтрації повідомлень між численними менеджерами і агентами, центральної довідкової бази даних, що зберігає інформацію про їх властивості і місцеположення, і т.п.;
- захищеність управління за допомогою використання відкритих стандартів безпеки ISO/OSI.

Фізична архітектура системи керування якістю TMN

Фізична архітектура TMN показує, як функції TMN, визначені у функціональній архітектурі, можуть бути реалізовані за допомогою інформаційних технологій, обчислювальної техніки і телекомунікаційного устаткування [9, 10, 7]. Фізична архітектура показує, як функціональні блоки можуть бути реалізовані за допомогою фізичних блоків.

Фізичним блокам відповідають устаткування зв'язку, ЕОМ, системне або прикладне програмне забезпечення. Опорні точки реалізуються за допомогою інтерфейсів. Фізична архітектура визначає, як функціональні блоки і опорні точки можуть бути реалізовані за допомогою програмно-апаратних засобів. Фізична архітектура TMN складається з наступних фізичних блоків [6]:

- елемент мережі (NE);
- пристрій медиации (Mediation Device, MD);
- Q-адаптер (QA);
- операційна система (Operation System, OS);
- робоча станція (Work Station, WS);
- мережа передачі даних (Data Communication Network, DCN).

Фізичні блоки є реалізацією однойменних функціональних блоків. Наприклад, блок "Елемент мережі" виконує функції устаткування зв'язку. Функції трансформації в даному випадку розділяються на дві складові: функції адаптації, які реалізують пристрої адаптації, і функції медиации, які виконують пристрої медиации.

Функції адаптації і що реалізовують дану функцію пристрою адаптації забезпечують інформаційний обмін між фізичними елементами, що не підтримують стандарти TMN, і елементами мережі або операційною системою, які відповідають принципам TMN. В цьому випадку необхідне застосування фізичного пристрою – Q-адаптера (QA) [4, 8].

Q-адаптер забезпечує підключення елементу мережі з несумісним з TMN інтерфейсом до Q-интерфейсу TMN. Характерним прикладом такої взаємодії може бути підключення застарілої електромеханічної або квазіелектронної АТС до мережі. Адаптер підтримує інтерфейси TMN, інтерфейс до не- TMN системі, а також при необхідності зовнішні інтерфейси для виведення інформації (наприклад, аварійною). Виділяють також X-адаптер, який дозволяє організовувати обмін інформацією між операційною системою TMN і несумісною з TMN операційною системою, яка не підтримує стандартний комутаційний

механізм TMN.

У свою чергу, пристрої медиации MD здійснюють трансформацію даних при обміні між фізичними блоками TMN, які підтримують несумісний механізм обміну інформацією. Тут також розрізняють Q-медиатор і X-медиатор. Q-медиатор підтримує з'єднання усередині TMN, а X-медиатор – між операційними системами різних TMN. Адаптери і медіатори можуть виконувати функції перетворення форматів даних.

Інформація про стан рівня поступає вгору, а зверху вниз йдуть дії, що управляють. Ступінь автоматизації управління може бути різним, і зазвичай має місце поєднання автоматизованих і ручних процедур. Як правило, чим вище рівень ієрархії управління, тим нижче його ступінь автоматизації.

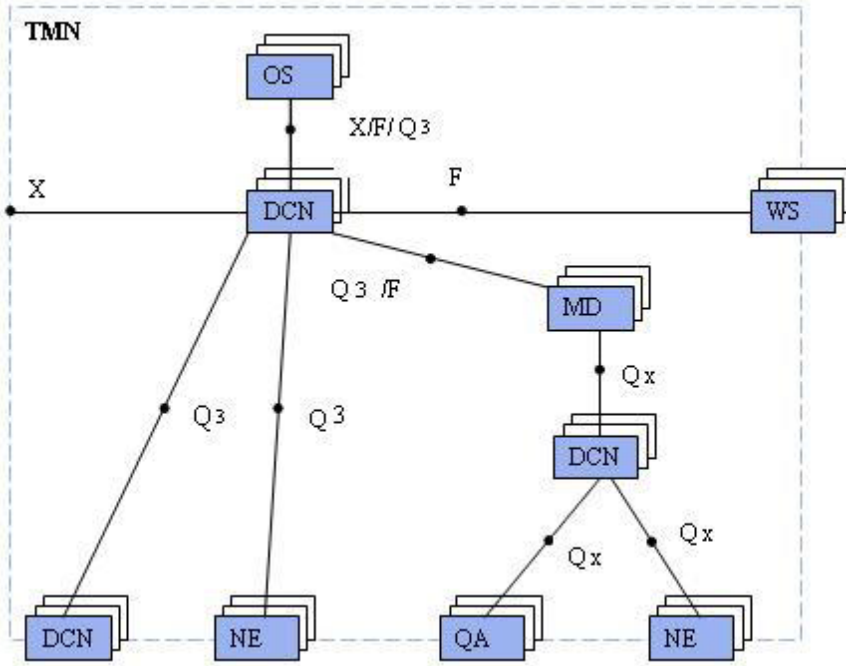


Рис. 2 – Фізична модель мережі TMN [4, 8]

Рівень елементів мережі є самою мережею зв'язку, тобто об'єкт управління. Як мережеві елементи можуть розглядатися комутаційні станції, системи передачі, мультиплексори, комплекти тестового устаткування і так далі

Рівень управління елементами охоплює контроль, відображення параметрів роботи, технічне обслуговування, тестування, управління стосовно окремих елементів або деяким їх підмножинам.

Як приклад можна привести наступні функції, виконувані на рівні управління елементом мережі [6, 7]:

- виявлення помилок і несправностей телекомунікаційного устаткування і систем зв'язку;
- вимірювання споживаної потужності;
- вимірювання температури устаткування;
- вимірювання задіяних ресурсів устаткування зв'язку, наприклад, завантаження центрального процесорного елементу, наявності вільного місця в буфері передачі/прийому, довжини черги і т.п.;
- реєстрація статистичних даних.

Рівень управління мережею здійснює функції управління, що стосуються взаємодії між багатьма видами телекомунікаційного устаткування. На рівні управління мережею внутрішня структура елементу мережі "невидима", це означає, наприклад, що стан буфера пристрою прийому/передачі, температура устаткування і тому подібне не можуть безпосередньо контролюватися і управлятися цим рівнем.

Приклади функцій, що виконуються на рівні управління мережею [6, 7]:

- створення повного уявлення про мережу (інформаційна модель мережі);
- створення обхідних шляхів встановлення з'єднання з метою підтримки QoS для кінцевих користувачів;
- модифікація і оновлення таблиць маршрутизації;
- моніторинг завантаження ліній і каналів зв'язку;
- оптимізація можливостей мережі для підвищення ефективності використання засобів і систем зв'язку;
- виявлення несправностей і помилок програмного забезпечення.

Рівень управління послугами (сервісами) піднімає питання управління, які безпосередньо стосуються користувачів послуг зв'язку. Це можуть бути клієнти оператора, абоненти мереж зв'язку, а також адміністрації операторів зв'язку або провайдерів послуг. Управління послугами здійснюється на основі інформації, яка надається рівнем управління мережею; при цьому рівень управління послугами "не бачить" детальну внутрішню структуру мережі. Маршрутизатори, АТС, системи передачі не можуть безпосередньо управлятися з рівня управління послугами.

Приклади функцій управління, які виконуються на рівні управління послугами [6, 7]:

- контроль якості послуг зв'язку (затримки, втрати і так далі);
- облік об'єму використання послуг зв'язку;
- додавання і видалення користувачів;
- призначення мережевих адрес і номерів телефонних апаратів.

Рівень управління бізнесом відповідає за управління цілим підприємством. Даний рівень займається питаннями довготривалого планування мережі з урахуванням фінансових аспектів діяльності організації, мережею, що володіє. На цьому рівні щомісячний і поквартально підраховуються доходи від експлуатації мережі і її окремих складових, враховуються витрати на експлуатацію і модернізацію мережі, приймаються

вирішення про розвиток мережі з урахуванням фінансових можливостей. Рівень бизнес-управления забезпечує для користувачів і постачальників послуг можливість надання додаткових послуг.

Основні стандарти впровадження TMN

Найважливіші документи МСЕ-Т, що мають відношення до TMN, згруповані в так зване М-семейство [7] та представлені на окремій веб-сторінці Міжнародної Телекомунікаційної Спілки – https://www.itu.int/rec/T-REC-M/en.

Документ М.3000 "Огляд рекомендацій в області TMN" [11] містить перелік всіх існуючих публікацій МСЕ-Т TMN і інших стандартів, які мають відношення до управління мережами зв'язку. Тут же дана коротка характеристика концепції TMN і розглянутий її взаємозв'язок з іншими телекомунікаційними технологіями.

У стандарті М.3010 викладені загальні принципи побудови і роботи мережі TMN, описані функціональні блоки, компоненти і інтерфейси, ієрархічна архітектура TMN, об'єкти управління і модель "менеджер-агент".

Рекомендації М.3016 "Огляд інформаційної безпеки TMN" разом з М.3016.0, М.3016.1, М.3016.2, М.3016.3, М.3016.4 відповідають за інформаційну безпеку, вимоги, сервіси та реалізацію.

Рекомендації М.3020 "Методологія визначення TMN-интерфейсов" присвячені функціональним можливостям TMN-интерфейсов і використовуваних ними протоколів.

Стандарт М.3200 "Послуги управління TMN" включає короткі описи прикладних сервісів TMN. Крім того, він вводить концепції "Управління телекомунікаціями" і "Область управління".

Конкретні послуги детально визначаються в наступних документах серії М.32хх: М.3201 (управління трафіком), М.3202 (управління системами сигналізації), М.3203 (управління призначеними для користувача сервісами), М.3207.1 (управління класами Ш-ЦСИО; у ранішій редакції - М.3205) і ін.

У документі М.3300 сформульовані вимоги до організації людино-машинного інтерфейсу (по термінології TMN-F–інтерфейсу), а в М.3320 – аналогічні вимоги для інтерфейсу між мережами TMN (X–інтерфейсу). Нарешті, стандарт М.3400 визначає функції управління в мережах TMN.

Названі публікації МСЕ-Т є частиною рекомендацій М-семейства, що регламентують функціонування мереж TMN. Крім того, окремим аспектам управління мережами зв'язку присвячені стандарти G-, Q- і X-семейств, які розробляють інші дослідницькі групи у складі МСЕ-Т.

Перспективність застосування TMN

Практично всі провідні розробники платформ управління, а серед них – Hewlett-Packard, Digital, Sun,Cabletron, IBM включили підтримку стандартів TMN в свої продукти, що свідчить про необхідність впровадження концепції TMN для керування різнородними мережами.

З'явилися нові невеликі компанії, які зробили розробку засобів TMN-управления своїм основним бізнесом, а це – ознака хороших перспектив нової для ринку технології. Велика частина телекомунікаційного устаткування нових технологій SONET/SDH, ATM, ADSL, безпровідних мереж та подібних сьогодні випускаються з вбудованою підтримкою інтерфейсу Q – одного з основних елементів архітектури TMN.

Ще одним показником перспективності архітектури TMN може служити інтерес, що проявляється до неї компанією Microsoft, в ринковій інтуїції якої важко засумніватися. Microsoft уклала партнерські угоди про взаємодопомогу при розробці продуктів TMN-управления на базі Windows сервера з двома провідними виробниками TMN-платформ – компаніями Hewlett-Packard і Vertel.

Недоліки в застосуванні TMN

До основних недоліків TMN можна віднести наступні:

- Технологія TMN бере свій початок з теорії, а не з практики.
- Технологія TMN з технічної точки зору не пропрацювала настільки, щоб вважатися закінченою стандартизованою технологією, яку можна було б реалізувати на практиці у вигляді конкретної завершеної системи.
- Існує більш менш стандартизована адаптація TMN до застосування на транспортних мережах SDH і мережах абонентського доступу ISDN (рекомендацій серії G і M). Проте для інших важливих телекомунікаційних технологій (наприклад, мережі IP) деталізована адаптація TMN відсутня.
- Рекомендації, які в своїй сукупності повинні давати повне уявлення про TMN, мають досить складну для правильної інтерпретації формальну мову опису з великою кількістю перехресних посилань, що утрудняє як читання, так і вивчення рекомендацій.
- Всі рекомендації, що мають відношення до TMN, досить складно подані та організовані в блоки і серії. Велика розкиданість і фрагментарність інформації роблять їх важкими для розуміння.
- Технічне втілення основних правил TMN регламентується цілими наборами рекомендацій, які не локалізовані в серії М і були розроблені в різні роки різними групами фахівців. З'єднати дані рекомендації в єдине "смислове поле" досить складно, з причини того, що основні цілі, ступінь деталізації і спрямованість окремих рекомендацій далеко не завжди відповідає проблематиці створення систем управління телекомунікаціями.
- У рекомендаціях МСЕ проблема управління телекомунікаційними мережами з погляду реальних операторів, виробників і споживачів висвітлена настільки абстрактно і настільки не відповідає сучасним реаліям, що багато технологічних рішень, визначених такою абстракцією, виявляються просто

незатребуваними і непотрібними.

- Багатьма експертами реалізація TMN-интерфейсов розглядається невиправдано складною і дорогою справою. Вважається, що протокольні стеки, регламентовані для Q-интерфейса, є дуже "переобтяженими" і "важкими". Також вважається, що верхні рівні моделі OSI для даних протокольних стеків стандартезовані досить слабо, є досить абстрактними, і крім того сильно ускладнені по структурі і методам взаємодії. Така ситуація приводить до неоднозначності інтерпретації інтерфейсів різними розробниками. Надмірна складність позначається на надійності і ціні програмного забезпечення.
- Наявність нових, рентабельніших, надійніших і, що дуже важливо, популярних комерційних технологій, що надають нові засоби реалізації інтерфейсів, однозначно ослабляють позиції TMN.
- Відчутно повільний розвиток, зміна і деталізація TMN відповідно до змін, що відбуваються в області комп'ютерної і телекомунікаційної індустрії.

Не дивлячись на вказані недоліки TMN все ж таки є найбільш перспективною схемою побудови системи управління телекомунікаційними мережами.

Література

1. Абрамов С.К. Лінії передачі: навч. посіб. / С. К. Абрамов. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т "Харк. авіац. ін-т", 2009. – 70 с.
2. Основы управления связью Российской Федерации /Булгак В.Б., Варакин Л.Е., Крупнов А.Е.и др.; Под. Ред. А.Е.Крупнова и Л.Е.Варакина.-М.: Радио и связь, 1998.-184с.
3. Скляр Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Бернард Скляр. – Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом "Вильямс", 2003. — 1104 с. : ил. — Парал, тит. англ.
4. Телекоммуникационные системы и сети. Том 1. Современные технологии. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003 – 647с
5. Теория сетей связи под редакцией В.Н. Рогинского. – М.: Радио и связь, 1981 – 192 с.
6. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. //Серия изданий «Связь и бизнес», М.: ИТЦ «Мобильные коммуникации», 2003.-384с.
7. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. - М.: Экотрендз, 2003.-288с.
8. А.В.Засецкий, А.Б.Иванов, С.Д.Постников, И.В.Соколов Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Часть II, под.ред. А.Б.Иванова – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 2001- 342с.
9. Van Landegem T., De Prycker M., Vandem Brande F. 2005: a vision of the network of the future//Electrical Communication/-1994.-3 rd Quarter.-P.231-240.
10. Kretsch Werner A., Little Artur D/ Telekommunications in the year 2010//Telcom report international/-1995/-№4.-P.10-13.
11. M.3000 : Overview of TMN Recommendations (Approved in 2000-02-01) // https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-M.3000-200002-I!!PDF-E&type=items

References

1. Abramov S.K. Linii peredachi: navch. posib. / S. K. Abramov. – H.: Nac. aerokosm. un-t "Hark. aviac. in-t", 2009. – 70 s.
2. Osnovy upravlenija svjaz'ju Rossijskoj Federacii /Bulgak V.B., Varakin L.E., Krupnov A.E.i dr.; Pod. Red. A.E.Krupnova i L.E.Varakina.-M.: Radio i svjaz', 1998.-184s.
3. Skljar Bernard. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie / Bernard Skljar. – Izd. 2-e, ispr. : Per. s angl. – M. : Izdatel'skij dom "Vil'jamc", 2003. — 1104 s. : il. — Paral, tit. angl.
4. Telekommunikacionnye sistemy i seti. Tom 1. Sovremennye tehnologii. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2003 – 647s
5. Teorija setej svjazi pod redakciej V.N. Roginskogo. – M.: Radio i svjaz', 1981 – 192 s.
6. Dymarskij Ja.S., Krutjakova N.P., Janovskij G.G. Upravlenie setjami svjazi: principy, protokoly, prikladnye zadachi. //Serija izdanij «Svjaz' i biznes», M.: ITC «Mobil'nye kommunikacii», 2003.-384s.
7. Grebeshkov A.Ju. Standarty i tehnologii upravlenija setjami svjazi. - M.: Jekotrendz, 2003.-288s.
8. A.V.Zaseckij, A.B.Ivanov, S.D.Postnikov, I.V.Sokolov Kontrol' kachestva v telekommunikacijah i svjazi. Chast' II, pod.red. A.B.Ivanova – M.: Kompanija SAJRUS SISTEMS, 2001- 342s.
9. Van Landegem T., De Prycker M., Vandem Brande F. 2005: a vision of the network of the future//Electrical Communication/-1994.-3 rd Quarter.-P.231-240.
10. Kretsch Werner A., Little Artur D/ Telekommunications in the year 2010//Telcom report international/-1995/-№4.-R.10-13.
11. M.3000 : Overview of TMN Recommendations (Approved in 2000-02-01) // https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-M.3000-200002-I!!PDF-E&type=items

Отримана/Received : 26.8.2017 р. Надрукована/Printed :18.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Бойко Ю.М.

УДК 004.912

Р.О. БАГРІЙ
Хмельницький національний університет

СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ СЛІВ ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ КОМУНІКАЦІЇ

У роботі проведено дослідження інтелектуалізації введення інформації за допомогою системи прискореного введення тексту в цифрові пристрої з метою побудови моделі корпусу розмовної української мови та системи набору тексту, яка базується на цій моделі. Така система використовує меншу кількість команд для введення букв та прогнозує варіанти слів, базуючись на даних корпусу слів та словосполучень для спілкування. Експериментально показано для побудованого корпусу достатньо ефективне введення тексту за допомогою 4-х та 6-и клавіш-команд.

Ключові слова: альтернативна комунікація, формування корпусу слів, N-грами, прогнозування.

R.O. BAGRIY
Khmelnytsky National University

WORD PREDICTION SYSTEM FOR ALTERNATIVE COMMUNICATION

This paper investigates the intellectualization of text input using a system for accelerated input of texts into digital devices with a view to constructing a model of a corpus of the Ukrainian spoken language and a text typing system based on this model. Such a system uses a smaller number of commands to input letters and predicts variants of words on the basis of the corpus of words and word combinations for communication. The described procedure for collecting texts containing such dialogues and an algorithm of actions for the formation of the educational corpus of words. The described in detail a statistical language model, which is proposed to be applied to the prediction of words. It is experimentally shown that the input of texts using four and six command keys is rather efficient for the constructed corpus.

Keywords: alternative communication, formation of a corpus of words, N-grams, prediction.

Вступ. Концепція додаткової та альтернативної комунікації (Augmentative and Alternative Communication – AAC) [1] полягає в наданні людям з обмеженими можливостями спілкування засобів для комунікації з зовнішнім світом. Основна проблема будь-якого засобу AAC полягає в малій кількості доступних керуючих сигналів, які необхідно зв'язати з великим набором символів комунікації.

В сучасних умовах розвитку IT-пристроїв спостерігається тенденція їх мінімізації за розмірами, включаючи перспективні розробки пристроїв-чіпів, що можуть бути імплантованими у тіло людини. Виходячи з цього, стає можливим застосування цих пристроїв не тільки у стаціонарних умовах, а й під час переміщень. Використання таких пристроїв людьми з обмеженими можливостями спілкування дозволяє реалізувати для них альтернативну комунікацію, яка не буде прив'язана до якогось певного місця.

Альтернативна комунікація передбачає підходи, методи та технології для перетворення даних, отриманих за допомогою AAC пристроїв в повноцінну інформацію. Таке перетворення пропонується реалізувати шляхом організації введення тексту меншою кількістю комунікаційних одиниць та створення програмного забезпечення для надання можливості спілкування.

Авторами запропоновано інформаційну технологію альтернативної комунікації [2, 3], апаратно-програмна реалізація якої повинна забезпечити комунікацію максимально можливими способами. Важливою частиною запропонованої інформаційної технології є інтелектуалізація введення інформації.

Метою роботи є дослідження інтелектуалізації введення інформації за допомогою системи прогнозування, що автоматично пропонує наступні слова, які найбільш часто зустрічаються після вже введених слів у реченні. Така система прогнозування тексту оптимізує продуктивність введення даних та зводить до мінімуму взаємодії з користувачем та базується на даних корпусу слів, що адаптований до потрібного виду комунікації.

Моделювання системи прогнозування тексту для спілкування. Алгоритми прогнозування здатні автоматично завершувати введення тексту, що дозволяє оптимізувати час введення. Для прогнозування потрібно знайти баланс між швидкістю введення і функціональністю. Чим більший словник і чим більше технологій введення використовується, тим повільніше стає час відгуку, але підвищується якість результатів.

Для дослідження і моделювання системи прогнозування тексту для спілкування пропонується наступний підхід, представлений параметрами:

1) формування множини (корпусу) слів (словосполучень) української мови, обмеженого словами для повсякденного спілкування;

2) застосування статистичної моделі мови для прогнозування наступних слів в словосполученні.

Для формування корпусу слів пропонується експертний підхід, що дозволив би за джерелами з контенту україномовних сайтів, періодичної преси, словників-розмовників тощо, підібрати слова та словосполучення, що використовуються в повсякденному спілкуванні. Для оцінки ймовірностей наступних слів у словосполученні, за цим корпусом, пропонується застосувати одну з статистичних моделей мови.

Для системи прогнозування тексту необхідно сформувати навчальний корпус адаптований до потрібного виду комунікації. Вибір навчального корпусу відіграє важливу роль в розробці будь-якої системи прогнозування тексту. Статистичні мовні моделі необхідно навчати за великим набором текстів для отримання достовірних оцінок ймовірності. Також, чим більше навчальний корпус схожий на даний вид

комунікації, тим більш точними будуть оцінки ймовірності.

Для української мови існує кілька відомих корпусів. Це Національний корпус української мови (НКУМ) [4], який зберігає тексти письмового та усного (розмовного) варіантів національної мови. Також Українським мовно-інформаційним фондом (УМІФ) створений Український національний лінгвістичний корпус – УНЛК [5], який налічує понад 43 млн. слововживань. Також створено корпус української мови на лінгвістичному порталі mova.info [6], який надає користувачам можливість пошуку слів з кількох підкорпусів, а саме художня проза, наукові, поетичні, фольклорні, законодавчі та публіцистичні тексти.

Існуючі мовні корпуси в більшості зберігають тільки письмові тексти різних стилів, а підкорпус розмовного стилю часто відображає тільки монологи чи стенограми засідань. Це пов'язано з тим, що збори текстів розмовного стилю вимагають як великої кількості інтерв'юерів і респондентів для запису аудіоматеріалу, так і трудомісткості розшифровки зібраних записів.

Інший варіант – це створення корпусу текстів мови спілкування з контенту розташованого в мережі Інтернет, який використовують при комунікації (листуванні) в соціальних мережах, чатах, по електронній пошті, на форумах тощо. Цей спосіб збору текстів досить швидкий, але має кілька недоліків. По-перше, під час Інтернет-комунікації співрозмовники не бачать один одного, по-друге, в ході написання часто використовуються скорочення, які в реальному спілкування не зустрічаються, по-третє, різний рівень знань учасників розмови призводить до великої кількості помилок у текстах та використання запозичених слів з інших мов. Ці недоліки вимагають значної ручної перевірки текстів, що є досить трудомістким для великих обсягів даних.

Таким чином, використання існуючих корпусів для реалізації комунікації між людьми неможливо і виникає необхідність сформувати обмежений підкорпус розмовної української мови.

Для розв’язання цієї задачі запропоновано використати діалоги на побутові теми, що використовуються в словниках-розмовниках для вивчення іноземних мов. Такі діалоги моделюють розмови між людьми, які бачать один одного, охоплюють найбільш можливі побутові ситуації та використовують обмежений набір слів і фраз. Для системи комунікації людей з обмеженими можливостями подібні властивості діалогу підходять як не можна краще.

Для збору текстів пропонується використати розмовники, підручники, посібники та інші Інтернет-ресурси, які містять розмовні діалоги. Отримані діалоги, для подальшого формування моделі, пропонується розбити на базові та тестові набори, з метою визначення достатньої наповненості корпусу для задачі прогнозування слів і словосполучень при введенні тексту.

Для побудови статистичної моделі мови необхідно обробити отриманий набір текстів. На сьогоднішній день існує безліч способів розбиття електронного тексту на окремо значущі одиниці для подальшої комп'ютерної обробки цих одиниць.

Для розв’язання поставленої задачі пропонується застосувати алгоритми обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP) [7]. В цих алгоритмах прийнято використати такі поняття: типи (types) – різні слова (послідовності слів) в тексті, токени (tokens) – все слова (послідовності слів) в тексті. Токенізація (tokenization) – процес розбиття даного тексту на одиниці, що називаються токенами.

Одним із способів формалізації в комп'ютерних науках є регулярні вирази [8] – мова для формування шаблонів, що використовуються для текстового пошуку рядків. Формально, регулярний вираз є алгебраїчним позначенням наборів рядків. Регулярні вирази полегшують обробку великих обсягів текстових даних за допомогою невеликої кількості шаблонів для пошуку. Регулярна функція для вираження пошуку, що застосовується до корпусу, повертає всі фрагменти тексту, що відповідають шаблону.

Всі отримані фрагменти тексту пропонується розбити на речення та видалити всі символи, що не відносяться до українського алфавіту. Далі, отримані текстові набори, пропонується:

- токенізувати – відокремити осмислені елементи (слова, фрази, символи) – токени;
- перевести всі букви в нижній регістр та видалити знаки пунктуації.

Таким чином, при підготовці статистичної мовної моделі буде враховуватися тільки набір символів, що відноситься до української мови.

Алгоритм токенізації отриманого набору текстів пропонується реалізувати за допомогою набору регулярних та лямбда виразів. Для видалення символів, що не відносяться до українського алфавіту пропонується застосувати наступні основні шаблони (табл. 1).

Таблиця 1

Шаблони регулярного виразу

Шаблон регулярного виразу	Значення
"[0-9]"	видалення цифр
"[A-Z,a-z]"	видалення букв англійського алфавіту
"[\"\\[\\]\',/=:;&(){}%*|<>\\+_@$#©«»]"	видалення спец. символів

Наступний крок полягає в обробці та розбитті отриманих текстів за допомогою лямбда-виразів (табл. 2).

Таблиця 2

Лямбда-вирази обробки тексту

Функції роботи зі строками	Значення
.Select(x => x.ToLower())	переведення в нижній регістр
.Select(x => x.Trim())	обрізка зайвих пробілів
.Select(x => x.Split())	розбиття речень на слова
.ToList()	формування списку речень

Для задач прогнозування тексту застосовуються статистичні моделі мови. В області комунікації ААС для прогнозування послідовності слів частіше всього використовується N-грамна модель. За допомогою інструментарію text2ngram [9] із списку речень генеруються N-грами у вигляді таблиць бази даних, що мають структуру зображену на рис. 1.

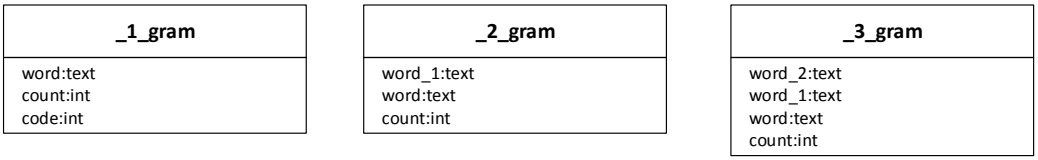


Рис. 1. Структура бази даних для збереження N-грам

Таблиці містять поля для збереження слів (word, word_1, word_2) та кількості їх попадань (count) в навчальних текстових наборах. Для таблиці юніграм також зберігається код слова (code), що обчислюється залежно від поточної розкладки символів на клавішах віртуальної клавіатури [3].

Метою побудови N-грам моделей є визначення ймовірності використання заданого слова чи фрази (словосполучення). Найбільш часто використовуються N-грамні моделі де N дорівнює 2 або 3, і називається вони відповідно біграмами і триграмами. Юніграми є виродженим випадком, коли припускається, що ймовірність кожного слова повністю незалежна від минулої історії. Чим більше N, тим краще точність прогнозування, але і тим більше використовується системних ресурсів. На рисунку 2 показано приклад розбиття набору текстів на юніграми, біграми та триграми.

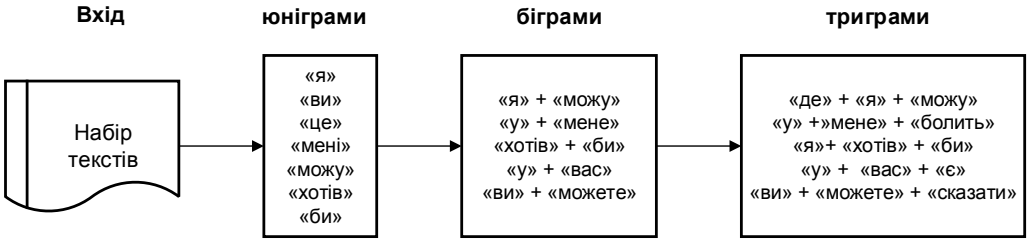


Рис. 2. Розбиття тексту на N-грами

N-грамні моделі визначають ймовірності використання заданої фрази (словосполучення), формально, як ймовірність виникнення послідовності слів у деякому корпусі (наборі текстів). Для оцінки цих ймовірностей використовують самий простий та найбільш інтуїтивний спосіб оцінки ймовірностей – метод максимальної подібності MLE (maximum likelihood estimation) [7].

Оцінка максимальної подібності полягає у визначенні параметрів, які максимізують ймовірність цієї подібності для заданих слів. Таким чином, MLE оцінка параметрів моделі N-грами може бути отримана як нормалізована кількість від корпусу, що використовується. Корпус є набір текстів, який статистично репрезентативний для моделювання мови. Наприклад, можна оцінити біграм-ймовірність слова w_n, враховуючи попереднє слово w_{n-1}, обраховуючи входження біграм $C(w_n, w_{n-1})$ та нормуючи сумою всіх біграм, які містять перше слово w_n:

$$P(w_n | w_{n-1}) = \frac{C(w_{n-1}, w_n)}{\sum_w C(w_{n-1}, w)}. \quad (1)$$

Так як кількість всіх біграм, що починаються зі слова w_{n-1} повинна дорівнювати кількості юніграм для цього слова w_{n-1}, (1) спрощується:

$$P(w_n | w_{n-1}) = \frac{C(w_{n-1}, w_n)}{C(w_{n-1})}. \quad (2)$$

В загальному випадку N-грам-моделі формула для оцінки параметрів MLE буде такою:

$$P\left(w_n \middle| w_{n-N+1}^{n-1}\right) = \frac{C\left(w_{n-N+1}^{n-1}, w_n\right)}{C\left(w_{n-N+1}^{n-1}\right)}. \quad (3)$$

Моделі N-грам в основному використовуються для прогнозування слів, тому що вони є ефективними і простими у використанні. До того ж статистика частот, яка використовується для розрахунку MLE оцінки, може бути отримана безпосередньо з текстів без особливих зусиль.

Класичний підхід до прогнозування по введеним буквам ускладнюється тим, що при використанні запропонованої технології прискореного введення на вхід подаються слова, зашифровані кодом, відповідним обраному порядку слідування букв на клавішах віртуальної клавіатури [3]. В цьому випадку одному коду може відповідати велика кількість слів-кандидатів. Для подолання цієї проблеми запропоновано використати статистичну модель мови Katz's backoff [7], що базується на корпусі слів.

Основною ідеєю Katz's backoff моделі є оцінка умовної ймовірності слова шляхом «відступу» до *n*-грами меншого порядку у випадку, коли використання більш високого порядку не знайдена у навчальному корпусі. Таким чином, модель з самої повною інформацією використовується для забезпечення найкращих результатів.

Зокрема, для найвищого порядку пропонується використати триграмну модель, і відступи виконувати рекурсивно до біграм та юніграм. Формула для триграм-моделі має наступний вигляд:

$$P_{BO}(w_n \mid w_{n-2}, w_{n-1}) = \begin{cases} P^*(w_n \mid w_{n-2}, w_{n-1}) & \text{якщо } C(w_{n-2}, w_{n-1}, w_n) > 0 \\ \alpha(w_{n-2}, w_{n-1}) P_{BO}(w_n \mid w_{n-1}) & \text{якщо } C(w_{n-2}, w_{n-1}) > 0 \\ P_{BO}(w_n \mid w_{n-1}) & \text{інакше} \end{cases}, \quad (4)$$

де

$$P_{BO}(w_n \mid w_{n-1}) = \begin{cases} P^*(w_n \mid w_{n-1}) & \text{якщо } C(w_{n-1}, w_n) > 0 \\ \alpha(w_{n-1}) P^*(w_n) & \text{інакше} \end{cases}, \quad (5)$$

$$P^*(w_n \mid w_{n-2}, w_{n-1}) = \frac{C^*(w_{n-2}, w_{n-1}, w_n)}{C(w_{n-2}, w_{n-1})}. \quad (6)$$

Тут P^* – згладжена ймовірність, обчислена за оцінкою Good-Turing [7] і α – коефіцієнти відступу. Коефіцієнт α пропонується прийняти рівним 0.4, як такий, що застосовується в алгоритмі Stupid backoff [7] та показує наближену до інших методів якість прогнозування та спрощує обчислення.

Ймовірність слів, що прогнозуються, обчислюються як оцінка моделі мови для поточного контексту. Згідно з рівнянням 4, якщо речення, що вводиться, складається з трьох або більше слів, для прогнозування використовується модель для триграм. Для розрахунку триграм-ймовірності використовуються два попередніх слова. Наприклад, для фрази "у мене болить" ймовірність для останнього слова буде записана як $P(\textit{болить} \mid \textit{у мене})$.

Для словосполучення з двох слів або у випадку, коли словосполучення не знайдено серед триграм, використовується модель для біграм (5). У цьому випадку для розрахунку ймовірності береться тільки попереднє слово – $P(\textit{болить} \mid \textit{мене})$.

Модель юніграм використовується у випадку, коли прогнозоване слово є першим в реченні (тобто відсутні попередні слова) або словосполучення не знайдено серед біграм або триграм. Імовірність слова буде дорівнювати його нормалізованій частоті – $P(\textit{болить})$.

Після оцінки ймовірностей всіх слів-кандидатів, прогнозовані слова впорядковуються, слова з найвищими ймовірностями відображаються користувачу для остаточного вибору.

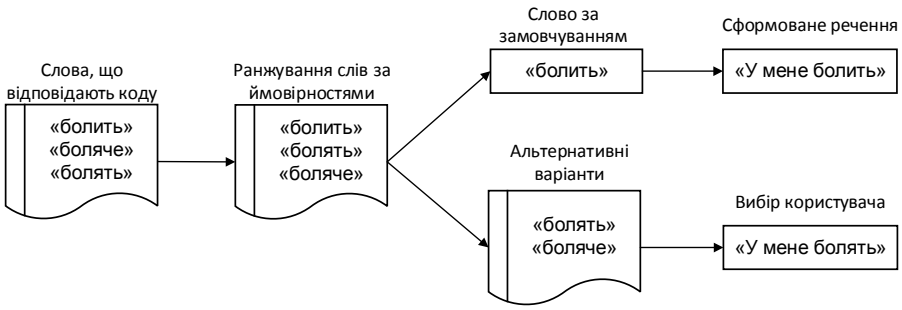


Рис. 3. Алгоритм формування речення

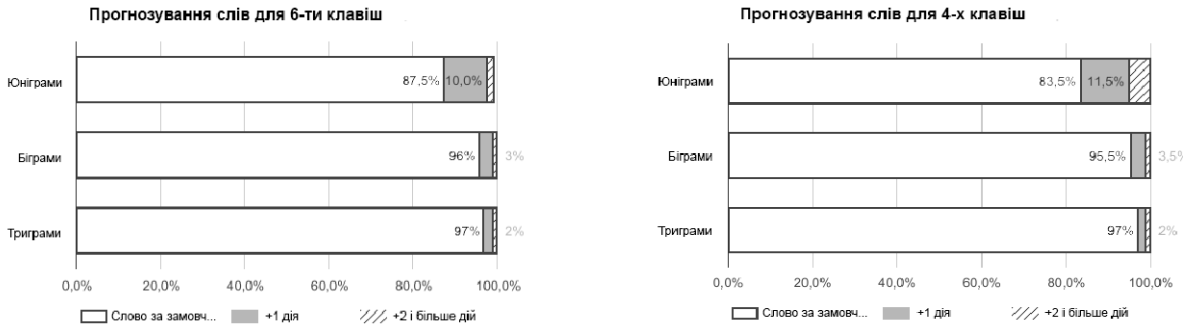
Для покращення процесу введення тексту необхідно, щоб якомога більше слів, що вводяться, прогнозувалися як слова "за замовчуванням", тобто відповідали вимогам користувача. Тоді це не

потребуватиме додаткових дій від нього. Якщо потрібне слово знаходиться нижче в списку прогнозованих слів, то його вибір вимагає одну додаткову дію за кожну позицію у списку (рис. 3).

Слід зазначити, що тільки слова, які є в словнику можуть бути прогнозовані. Якщо слово відсутнє в словнику, то для його введення необхідно затратити набагато більше часу, так як його потрібно ввести повністю по буквах.

Для визначення якості прогнозування було проведено ряд експериментів для кожної з моделей. Тестування було проведено для 6-и клавіш клавіатурного порядку слідування букв і 4-х клавіш частотної послідовності слідування букв з урахуванням голосних / приголосних [3]. На момент проведення тестування приблизна кількість типів юніграм дорівнювала 15000, біграм – 65000, триграм – 93000.

Початкове тестування полягало в прогнозуванні того ж тексту, на основі якого були сформовані N-грам-моделі. Загальна кількість фраз для прогнозування склала понад 18000.



а) б)

Рис. 4. Прогнозування слів за різними моделями: а) для 6-и клавіш розподілу; б) для 6-и клавіш розподілу

Юніграм-модель показала низьку якість прогнозування – 87.5% для 6-и клавіш (рис. 4, а) і 83,5% для 4 клавіш (рис. 4, б) розподілу. В інших випадках необхідно застосовувати одну додаткову дію для вибору слова, а іноді дві і більше таких дій. Для біграм-моделі цей показник значно більше і практично однаковий для обох випадків – 95.5–96%. Цього цілком достатньо для комфортної роботи. Триграм-модель ще трохи покращує прогнозування, і якість майже не залежить від кількості клавіш віртуальної клавіатури.

Наступні тестування полягали в прогнозуванні довільного тексту. Обсяг тексту склав близько 3000 фраз з загальною кількістю понад 15000 слів. Для 6-и блоків вірно було прогнозовано 90% слів, відомих N-грам-моделі. Для 4-х блоків, якість прогнозування склала 89%. Зниження точності прогнозування можна пояснити тим, що в довільному тексті завжди присутній певний відсоток нових типів біграм та триграм. Також, у разі відсутності слова в N-грам-моделі, наступне за ним слово може бути прогнозовано тільки за юніграм-моделлю.

Висновки. У статті для реалізації інформаційної технології альтернативних підходів до спілкування, запропонована система прогнозування, що автоматично пропонує наступні слова, які найбільш часто зустрічаються після вже введених слів у реченні. Надана модель комунікації для повсякденного спілкування, що передбачає використання розмовних діалогів на побутові теми. Описаний принцип збору текстів, що містять такі діалоги та алгоритм дій для формування навчального корпусу слів. Детально описана статистична модель мови, що пропонується застосувати для прогнозування слів, що дозволить прогнозувати слова, які є в словнику, з ймовірністю 89–90% для довільного тексту.

Подальші дослідження спрямовані на реалізацію запропонованого способу альтернативного спілкування за допомогою стандартних гаджетів (планшети, телефони) з метою використання для організації діалогів з людьми, у яких тимчасово відсутній або ускладнений канал основний вербальної комунікації. Оскільки запропонований підхід є загальним, то будуть проведені дослідження можливості його використання для інших мов.

Література

1. Augmentative and Alternative Communication (AAC) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.asha.org/public/speech/disorders/AAC/.

2. Кривонос Ю.Г. Новые средства альтернативной коммуникации для людей с ограниченными возможностями / Ю.Г. Кривонос, Ю.В. Крак, А.В. Бармак, Р.А. Багрий // Кибернетика и системный анализ. – 2016. – Том 52, № 5. – С. 3–13.

3. 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.

4. Демська-Кульчицька О. Національний корпус української мови: концептуальний аспект / О. Демська-Кульчицька // Лексикографічний бюлетень : зб. наук. пр. – К. : Ін-т української мови НАН України, 2006. – Вип. 13. – С. 5–9.

5. Сидорчук Н. М. Организация данных и функциональная структура лексикографической системы «Украинский национальный лингвистический корпус» / Н. М. Сидорчук // Математичні машини і системи. –

2006. – № 2. – С. 126–135.

6. Дарчук Н. Дослідницький корпус української мови: основні засади і перспективи / Н. Дарчук // Вісник Київського національного університету імені Т.Г. Шевченка. – 2010. – № 21. – С. 45–49.

7. Jurafsky D. Speech and Language Processing / D. Jurafsky, J. H. Martin. – 2nd ed. – New Jersey : Prentice Hall, 2008. – 1024 p.

8. Bird S., Klein E., Loper E. Natural Language Processing with Python. – O'Reilly, 2009. – 504 p.

9. Xueqiang Lu. Statistical Substring Reduction in Linear Time / Xueqiang Lu, Le Zhang and Junfeng Hu. – Natural Language Processing. – IJCNLP, 2004. – P. 320–327.

References

1. Augmentative and Alternative Communication (AAC) [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : http://www.asha.org/public/speech/disorders/AAC/.

2. Kryvonos Yu.H. Novye sredstva alternatyvnoi kommunykatsyy dlia liudei s ohranychennymy vozmozhnostiamy / Yu.H. Kryvonos, Yu.V. Krak, A.V. Barmak, R.A. Bahryi // Kybernetyka y systemnyi analyz. – 2016. – Tom 52, # 5. – S. 3–13.

3. Krak Yu.V. Systema vvoda teksta dlia alternatyvnoi kommunykatsyy / Yu.V. Krak, A.V. Barmak, R.A. Bahryi // Problemy upravlenyia y ynformatyky. – 2017. – # 3. – S. 5–13.

4. Demska-Kulchytska O. Natsionalnyi korpus ukrainskoi movy: kontseptualnyi aspekt / O. Demska-Kulchytska // Leksykohrafichnyi biuleten : zb. nauk. pr. – K. : In-t ukrainskoi movy NAN Ukrainy, 2006. – Vyp. 13. – S. 5–9.

5. Sydorchuk N. M. Orhanyzatsyia dannykh y funktsyonalnaia struktura leksykohrafycheskoi systemy «Ukraynskyi natsyonalnyi lynhvystycheskyi korpus» / N. M. Sydorchuk // Matematychni mashyny i systemy. – 2006. – # 2. – S. 126–135.

6. Darchuk N. Doslidnytskyi korpus ukrainskoi movy: osnovni zasady i perspektyvy / N. Darchuk // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni T.H. Shevchenka. – 2010. – # 21. – S. 45–49.

7. Jurafsky D. Speech and Language Processing / D. Jurafsky, J. H. Martin. – 2nd ed. – New Jersey : Prentice Hall, 2008. – 1024 p.

8. Bird S., Klein E., Loper E. Natural Language Processing with Python. – OReilly, 2009. – 504 p.

9. Xueqiang Lu. Statistical Substring Reduction in Linear Time / Xueqiang Lu, Le Zhang and Junfeng Hu. – Natural Language Processing. – IJCNLP, 2004. – R. 320–327.

Отримана/Received : 2.8.2017 р. Надрукована/Printed :14.9.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

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 № 1 від 31.08.2017 р.

Підп. до друку 15.09.2017 р. Ум.друк.арк. 26,42 Обл.-вид.арк. 29,21
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