ISSN 2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

6.2015

ВІСНИК

Хмельницького національного університету

Технічні науки
Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2015, Issue 6, Volume 231

Хмельницький

ВІСНИК
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
серія: Технічні науки

Затверджений як фахове видання
Наказ МОН 04.07.2014 №793

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

Хмельницький, 2015, № 6 (231)

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

Включено до наукометричних баз:

РИНЦ	http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650
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
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221

Головний редактор	**Скиба М. Є.**, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, д.т.н., професор, ректор Хмельницького національного університету
Заступник головного редактора	**Параска Г. Б.**, д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Хмельницького національного університету
Відповідальний секретар	**Гуляєва В. О.**, завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Технічні науки

Березненко М.П., 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., Камбург В.Г., д.т.н. (Росія), 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., Кофанов Ю.М., д.т.н. (Росія), Мазур М.П., д.т.н., Мандзюк І.А., 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., Пастух І.М., д.т.н., Поморова О.В., д.т.н., Пановко Г.Я., д.т.н. (Росія), 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., 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), Троцишин І.В., д.т.н., Шалапко Ю.І., д.т.н., Шинкарук О.М., д.т.н., Шклярський В.І., д.т.н., Щербань Ю.Ю., д.т.н., Юрков М.К., д.т.н. (Росія), 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 № 4 від 26.11.2015 р.

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

☎ (038-22) 2-51-08 **web:** http://journals.khnu.km.ua/vestnik
e-mail: visnyk_khnu@rambler.ru 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, 2015
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2015

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

П.В. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕНКО, В.О. КУРСКАЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В АЗОТОВАНИХ ШАРАХ ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ 7

І.М. ПАСТУХ, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ
ВНУТРІШНІ ЛОКАЛЬНІ ВИНЯТКИ ПОВЕРХНІ, АЗОТОВАНОЇ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ 12

П.В. МАТВІЇШИН
ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ АРГОНУ І ТИСКУ НА ВЛАСТИВОСТІ АЗОТОВАНОГО ШАРУ ПРИ ІОННОМУ АЗОТУВАННІ 16

В.О. СЛАЩУК, О.О. СЛАЩУК
АНАЛІЗ ПЛЯМ ФРЕТИНГ-КОНТАКТУ ДВОХ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 19

Ю.С. КРУТІЙ
ТОЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ВИМУШЕНИХ ПОЗДОВЖНІХ КОЛИВАНЬ СТЕРЖНЯ З ДОВІЛЬНИМИ НЕПЕРЕРВНИМИ ПАРАМЕТРАМИ 23

О.В. ПЕТРОВ, С.І. СУХОРУКОВ, М.В. ТРОФИМЧУК, В.А. ПОДОЛЯК
ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ЗАТИСКНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ 29

Г. А. АВАНЕС'ЯНЦ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ УСИЛИЙ НА ДИСКАХ ШКИВОВ КЛИНОРЕМЕННЫХ ВАРИТОРОВ И КООРДИНАТ ТОЧЕК ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ 34

В.О. ХАРЖЕВСЬКИЙ
МЕТОДИКА ПЕРЕВІРКИ НАЯВНОСТІ ДОТИКУ 5-ГО ПОРЯДКУ У СИНТЕЗІ ВАЖІЛЬНИХ КРУГОВИХ НАПРЯМНИХ МЕХАНІЗМІВ 39

Г.М. ДРАПАК
ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ МАШИН 46

А.В. ГОРОШКО
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ УСІЧЕНОЇ ОЦІНКИ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ ПІД ЧАС РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТІВ РОТОРА 49

О.М. СИНЮК, М.Є. СКИБА
МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОШАРОВИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ 54

Д.А. НАГОВСКИЙ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ ЗАЩИТЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ НА СУДАХ 62

А.О. ТОВКАЧ , В.В. БОГАЧУК, Л.Г. КОЗЛОВ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІДРОПРИВОДА З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОДАЧІ НАСОСА 67

Т.Я. БІЛА, В.В. СТАЦЕНКО
СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРАМИ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЕРУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ 73

Ю.О. ДЕНИСЕНКО, В.О. ЗАЛОГА, О.В. ІВЧЕНКО, О.П. МАСЛОВ
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ПЕРЕБІГУ ЇЇ ПРОЦЕСІВ 77

Г.С. КАЛДА, Н.О. СЬОМАК
ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОЕНЕРГЕТИКИ В ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ 82

M.G. SHKARABURA, O.M. ZEMLYANSKYI, O.M. MIROSCHNIK, M.V. LAVRUSENKO
ANALYSIS OF WAYS OF DE-ENERGIZATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS WITH AIR POWER NETWORK INPUT 85

А.П. БІЛИК, Д.А. ФУТОРНИЙ
МЕБЛЕВА ПРОМИСЛОВІСТЬ: АНАЛІЗ УМОВ ПРАЦІ ТА СТАН ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ В ГАЛУЗІ 89

J. MORAVEC
TOOLS FOR HYDROSTATIC SHAPING OF METAL SHEET 93

V.V. ROMANUKE
META-MINIMAX APPROACH FOR OPTIMAL ALTERNATIVES SUBSET REGARDING THE CHANGE OF THE RISK MATRIX IN ENSURING INDUSTRIAL AND MANUFACTURING LABOR SAFETY 97

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

А.Л. СЛАВІНСЬКА
ЛОГІСТИЧНА КООРДИНАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ СЕРІЇ МОДЕЛЕЙ ШВЕЙНИХ ВИРОБІВ 100

Ю.В. КОШЕВКО
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДФОРМОВАНИХ ДЕТАЛЯХ ГОЛОВНИХ УБОРІВ ГІДРОВІДЦЕНТРОВИМ СПОСОБОМ 107

І.Т. СОЛТИК
ЦИФРОВА МОДЕЛЬ І ГЕОМЕТРИЧНИЙ ОБРАЗ УМОВНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ПЛОСКО-ВАЛЬГУСНОЇ СТОПИ ДІТЕЙ ВІКОМ 4,5–10 РОКІВ 111

В.О. ПРИВАЛА, О.С. ЗАСОРНОВ
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВОВНЯНОЇ ПРЯЖІ В УМОВАХ ТЕКСТИЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ 115

О.М. ГУЩАК, Б.Д. СЕМАК
ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННИХ БАРВНИКІВ ДЛЯ СВІТЛОСТАБІЛІЗАЦІЇ ШОВКОВИХ І КАПРОНОВИХ ПЛАТТЯНИХ ТКАНИН 119

Г.М. ХИМИЧ, М.О. КУЩЕВСЬКИЙ
ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ВОВНЯНИХ ТКАНИН ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОСТОРОВОЇ ВІБРАЦІЇ 126

А.П. ПОНОМАРЕНКО
КОМПОЗИТНИЙ МЕТОД МАТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ДИЗАЙНЕРСЬКИХ РІШЕНЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВАРІАНТНИХ МОДЕЛЕЙ ТИПОВОГО СИСТЕМНОГО МОДУЛЯ 130

О.В. СКІДАН., В.В. СКІДАН
ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ АНТРОПОМЕТРИЧНИМИ ОЗНАКАМИ СТОП ДІТЕЙ-ШКОЛЯРІВ 136

О.В. ФЕДОРЧЕНКО, О.В. ЗАКОРА
АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ І ЧЕРГУВАННЯ ОСНОВНИХ І УТОКОВИХ ПЕРЕКРИТТІВ НА ЕЛЕМЕНТИ ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ ТКАНИН 144

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Л.П. БЕДРАТЮК, Г.І. БЕДРАТЮК
ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ MAPLE В КЛАСИЧНИХ КРИПТОСИСТЕМАХ 148

Л.О. ЛІТВІЦЬКИЙ, В.М. ЧЕШУН, В.І. ЧОРНЕНЬКИЙ
ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ДЕКОДЕРА ПЕРЕШКОДОСТІЙКИХ КОДІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 154

М.О. ГУМЕНЮК, В.В. МАРМОЛЮК, В.М. ЧЕШУН
МОДЕЛЬ ТА ОЦІНОЧНІ ФУНКЦІЇ ПІДГОТОВКИ ДАНИХ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ДИНАМІЧНОГО СИНТЕЗУ ДИСКРЕТНИХ ТЕСТІВ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ 157

А.О. НІЧЕПОРУК
МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЯВЛЕННЯ МЕТАМОРФНИХ ВІРУСІВ НА ОСНОВІ ПОРІВНЯННЯ ЇХ ПОВЕДІНКИ 160

К.Ю. БОБРОВНІКОВА
МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЯВЛЕННЯ БОТ-МЕРЕЖ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ DNS-ТРАФІКА 164

В.І. КУНЧЕНКО-ХАРЧЕНКО
МЕХАНІЗМ ЛІНГВІСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ЗБЕРЕЖЕНИХ ДАНИХ WWW-РЕСУРСУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦИКЛІВ РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ 173

О.В. КЛІЩ, О.В. ОГНЄВИЙ
МЕТОД ВІДСЛІДКОВУВАННЯ МОБІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ПЕРЕХОПЛЕНИМИ «ПРОБНИМИ» ПАКЕТАМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО WIFI 178

С. Г. ОЖАРОВСЬКИЙ, О. А. МЯСІЩЄВ
МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ, ПО КОРОТКОМУ СЛОВНИКУ, З ВИКОРИСТАННЯМ MEL-КЕПСТРАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ 181

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, В.А. СОБЧЕНКО
РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ПІДСИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОМПЛЕКСУ 184

І.М. ЛАЗАРОВИЧ, С.І. МЕЛЬНИЧУК
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАВАДОСТІЙКОГО ПЕРЕДАВАННЯ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПРОЦЕДУРИ РАНДОМІЗАЦІЇ 188

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, Л.В. КАРПОВА, Д.О. ЛЕВЧУНЕЦЬ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ УЗГОДЖЕНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПІДХОДІВ ЛОКАЛЬНО-БАЗИСНОГО АНАЛІЗУ 192

В.П. СЕМЕРЕНКО
КОДУВАННЯ КОДІВ РІДА-СОЛОМОНА НА ОСНОВІ АВТОМАТНИХ МОДЕЛЕЙ 196

В.А. СІВАК
МЕТОДИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАЛЕЖНОСТІ КОМПОНЕНТІВ ДІАГНОСТИЧНИХ ЗАСОБІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТЕХНОЛОГІЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ 203

С.А. РУСАНОВ, Д.О. ДМИТРІЄВ, О.О. ЛОБОВ, П.П. РЕМІЗОВ
ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕУ «КАСКАД-3» І ЗМІШАНІ ЗАДАЧІ В АЛЬТЕРНАТИВНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ 209

С.М. БОЙКО, О.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, А.В. ПИРОЖЕНКО, С.Я. ВИШНЕВСЬКИЙ
ЛАБОРАТОРНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПРИСТРОЇВ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ 212

А.И. КУЗЬМИЧЁВ, Л.Ю. ЦЫБУЛЬСКИЙ
ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ИОНИЗАТОР ПАРОВ МЕТАЛЛОВ 217

В.А. ПОРЄВ, К.М. БОЖКО, С.Ю. СИДОРЕНКО
ЗБУДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДЕФЕКТІВ . 224

К.Л. ГОРЯЩЕНКО, С.Л. ГОРЯЩЕНКО
ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ СКЛАДОВИХ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ФАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ 231

О.М. СТАЩУК, Д.М. СТЕПАНОВ, Д.Г. БАГАЧУК
ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СКЛА ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА НА МАТЕРІАЛЬНУ ДИСПЕРСІЮ СИГНАЛУ 234

МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

УДК21.785.53

П.В. КАПЛУН, В.А. ГОНЧАР, Т.В. ДОНЧЕНКО, В.О. КУРСКАЯ
Хмельницький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В АЗОТОВАНИХ ШАРАХ ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ

Наведені результати досліджень і новий спосіб визначення залишкових напружень в дифузійних покриттях на прикладі азотованих шарів після іонного азотування в безводневих середовищах сталі 40Х. Проведено порівняння величини залишкових напружень в азотованих шарах в ході їх визначення за новим та іншими відомими способами. Показано переваги нового способу.

Ключові слова: залишкові напруження, шар, азотування, покриття.

P.V. KAPLUN, V.A. GONCHAR, T.V. DONCHENKO, V.O. KURSKAJA
Khmelnytskyi National University

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN LAYERS NITRIDED AFTER ION NITRIDING

Analysis of different methods of determining residual stresses in coatings applied to metals with different technologies discussed their advantages and disadvantages. A new method for determining residual stresses in the diffusion coatings. The results of studies of residual stresses in the diffusion coatings on the example of a new way of nitrided layers after ion nitriding in nonhydrogen environments steel 40H. A comparison of the value of residual stresses in the nitrided layers defined by new and known methods.

Keywords: residual stresses, layer, nitriding, coating.

Вступ

Підвищення зносостійкості,надійності і довговічності конструкційних елементів є одним з важливіших завдань машинобудування. Одним із перспективних напрямів в вирішенні цього завдання є зміцнення поверхні з застосуванням функціональних покриттів. В даний час в промисловості застосовується багато методів нанесення покриттів з використанням процесів осадження, дифузії, імплантації, електроіскрового і лазерного легування тощо та існує більше сотні різних технологій зміцнення поверхні з використанням даних методів. При нанесенні покриттів в поверхневих шарах виникають залишкові напруження, що впливають на напружено-деформований стан, міцність і експлуатаційні характеристики конструкційних елементів [1–11]. Залишкові напруження можуть досягати великих значень і мати різні знаки (стиску або розтягу) в залежності від технології та властивостей нанесених покриттів [1, 2, 6, 10, 11]. 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, 6, 7, 12]. 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. Виникнення залишкових напружень в покриттях обумовлено різними факторами: різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів основи і покриття, наявністю захоплених атомів газу, дефектністю конденсату, тощо.

Дослідженнями [1, 6, 9] показано, що в дифузійних покриттях виникають залишкові напруження стиску, які позитивно впливають на міцність і довговічність конструкційних елементів при розтягу, багатоцикловій втомі при згині та контактній витривалості при циклічному навантаженні. Залишкові напруження не рівномірно розподіляються по товщині покриття, а їх величина та характер розподілу залежать і керуються технологічними параметрами процесу дифузійного насичення.

Виділяють два механізми виникнення залишкових напружень в покриттях, що отримуються методом осадження: структурний та температурний. Структурні напруження в PVD-покриттях пов'язують з дефектністю при формуванні конденсату, вони є чутливими до мікроструктури покриття і залежать від умов конденсації, а також від часу нанесення, тобто від товщини покриття [12–14]. Температурна складова напружень обумовлена різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів покриття та основи. PVD-покриттям, як правило, притаманні залишкові напруження стиску, які, в залежності від товщини покриття та матеріалу основи, можуть переходити в слабо розтягуючі. Високий рівень залишкових напружень стиску багато в чому обумовлює підвищення тріщиностійкості та зносостійкості поверхонь, модифікованих вакуум-плазмовими покриттями, а також позитивно впливає на такі характеристики, як границя витривалості та границя текучості. Разом з тим, значні за величиною залишкові напруження стиску роблять покриття більш крихким, можуть призводити до його спонтанного відшарування ще до початку експлуатації або до порушення зчеплення основи з покриттям в процесі експлуатації.

Основна частина

В даний час існує багато способів визначення залишкових напружень, серед яких найбільш

поширені експериментально-розрахункові методи. Для практики надзвичайно велике значення має визначення величини і характеру залишкових напружень з врахуванням матеріалу і конструктивних особливостей деталей машин, виду покриттів та технології їх нанесення. Серед існуючих способів більшість присвячена визначенню середньої величини залишкових напружень в покриттях, що одержуються методом осадження, з допущення їх рівномірного розподілу по товщині [7, 12, 15–17]. Приклади визначення таких залишкових напружень в вакуум-плазмових покриттях описані в роботах [16, 17] і здійснювались на основі експериментально-розрахункового методу гнучкого зразка, який полягає в тому, що під дією залишкових напружень в покритті, довга, вузька і тонка пластинка, на яку воно нанесено, деформується у вигляді дуги кола. Прогин або радіус кривизни деформованого зразка дозволяє розрахувати залишкові напруження [16, 17]. Перевагою такого розрахунково-експериментального методу є те, що напруження розраховуються за остаточним результатом, тобто їх походження не має значення. Вакуум-плазмові покриття наносили на сталеві зразки розміром 120×5×0,5 мм методом конденсації з плазмової фази в умовах іонного бомбардування поверхні на устаткуванні ННВ-6,6-И1 («Булат-20»). Після нанесення покриття визначали прогин, набутий в результаті дії залишкових напружень.

Виходячи з величини виміряного прогину, використовуючи рівняння пружної лінії для балки, залишкові напруження можна визначити за залежністю [16]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{32E_o H_o^3 f}{3a^2 h_n \left(1-\nu_o\right)\left(2H_o + h_n\right)}, \quad (1)$$

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.

З використанням методу розрахунку тонких пластин на вигин можна визначити $\sigma_n^{зал}$ наступним чином [17]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{4E_o H_o^3}{3Rh_n \left(1-\nu_o^2\right)\left(2H_o + h_n\right)}, \quad (2)$$

де R – радіус кривизни, який отримує зразок в результаті деформації, що спричиняється залишковими напруженнями і визначається через прогин f і хорду.

Для визначення структурної складової залишкових напружень зразок з покриттям нагрівали до температури, що відповідає температурі нанесення покриття, в результаті релаксації термічної складової залишкових напружень зразки втрачають частину прогину. Прогин зразка, що залишився в умовах температури нанесення покриття, відповідає дії залишкових напружень структурного походження.

Значно менша частина способів існує для визначення залишкових напружень в дифузійних покриттях, в яких має місце значна нерівномірність їх розподілу по товщині покриття, що є важливим для експлуатаційних характеристик. Прикладом визначення таких залишкових напружень в дифузійних покриттях є метод М.М. Давиденкова [5].

Величина залишкових напружень і їх розподіл по глибині дифузійного шару визначається за методом М.М. Давиденкова [5] шляхом безперервного видалення травленням напруженого шару с одночасним автоматичним записом кривої деформації плоского зразка на приладі ПІОН. Розрахунок напружень проводиться за формулою:

$$\sigma = \frac{E \cdot a^2 \cdot K}{3b^2} \cdot \frac{df}{da}, \quad (3)$$

де **E** – модуль пружності матеріалу, Па;

a – товщина зразка в середньому січенні без половини стравленого шару, мм;

b – половина віддалі між осями зажимних гвинтів, мм;

df/da – інтенсивність зміни стріли прогину зразка в залежності від його товщини;

K – коефіцієнт, що дорівнює відношенню масштабів запису по осях X і Y.

Недоліком методу є те, що він складний, вимагає спеціального обладнання і відповідних травників для покритті.

Нами запропоновано більш простий експериментально-розрахунковий спосіб визначення залишкових напружень в дифузійних покриттях, який включає визначення параметра відхилення зразка в вигляді пластини певного січення від прямолінійного положення при навантаженні консольно защемленого зразка з покриттям на верхній площині та ідентичного зразка без покриття однаковим вантажем величиною P, який створює в зразку без покриття максимальні напруження згину, що мають величину більшу за залишкові напруження, але не перевищують границю пропорційності матеріалу. Вимірюють відхилення кожного зразка від початкового положення і знаходять різницю прогинів зразків з дифузійним покриттям і без покриття. За цією різницею прогинів з формули прогину консольної балки визначають силу P_1, по якій знаходять величину залишкових напружень за формулою згину консольної баки при дії відомого згинального моменту і моменту опору січення зразка.

Алгоритм реалізації наступний. На стальну пластину шириною b і товщиною h з одного боку наносять дифузійне покриття методом іонного азотування за певним режимом, консольно закріплюють

зразок до верху покриттям. Протилежний кінець зразка на віддалі L навантажують силою P і з допомогою лазерного датчика з великою точністю заміряють стрілу прогину Y_1. Аналогічно вимірюємо стрілу прогину Y_2 для зразка без покриття (рис. 1). Знаходимо різницю прогинів:

$$Y = Y_2 - Y_1. \tag{4}$$

З формули прогину консольної балки під дією сили P_1

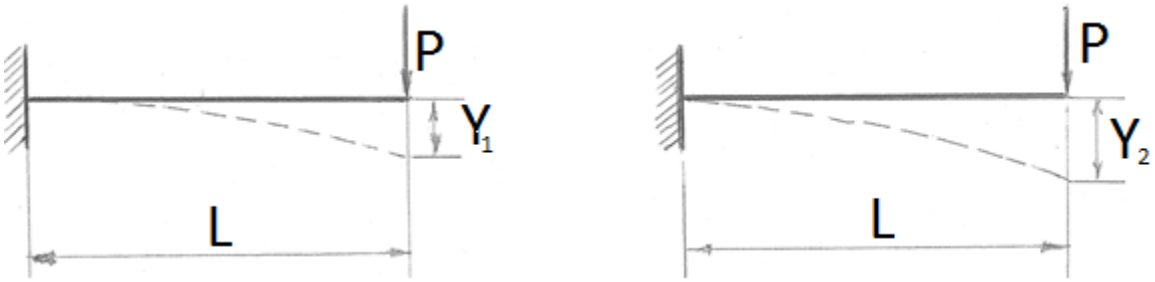
$$Y = \frac{P_1 L^3}{3EJ_Z}, \tag{5}$$

знаходимо P_1.

$$P_1 = \frac{3YEJ_Z}{L^3}, \tag{6}$$

де E – модуль Юнга матеріалу пластини;

J_z – момент інерції поперечного січення пластини.



а б

Рис. 1. Схема навантаження пластини при випробуваннях:
а – пластина з покриттям; б – пластина без покриття

Визначаємо середнє значення залишкових напружень за формулою:

$$\sigma = \frac{6P_1 L}{bh^2}. \tag{7}$$

Величину залишкових напружень в любій точці покриття знаходимо за формулою:

$$\sigma_z = \sigma \cdot e^{-\frac{k(z-0.45h_n)}{(h_n - z)^{0.94}}}, \tag{8}$$

де z – віддаль від поверхні до точки знаходження залишкових напружень в покритті;

h_n – товщина покриття;

k – коефіцієнт, що враховує вплив температури T°K нанесення дифузійного покриття. Наприклад, при іонному азотуванні k = 900/ T°K, який знаходиться з експерименту.

Наводимо конкретні приклади реалізації запропонованого способу:

Пластини із сталі 40Х товщиною 3 мм і шириною 12 мм після іонного азотування за різними режимами (табл. 1) навантажували силою P = 60 Н на віддалі L = 140 мм від защемленого кінця і заміряли прогин пластини Y_1 в місці прикладання сили. Аналогічно навантажували ідентичну пластину без покриття такою ж силою P і заміряли прогин Y_2. Використовуючи формули (4), (6) і (7) знаходимо Y, P_1 і σ для кожного режиму іонного азотування. Результати експериментів та розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Залежність середніх залишкових напружень в сталі 40Х після різних режимів іонного азотування в без водневих середовищах

Режим азотування	Технологічні параметри				Мікротвердість H_{100}, МПа	Товщина покриття h_n, мкм	Прогин $Y=Y_2-Y_1$, мм	Навантаження P_1, Н	Середні залишкові напруження σ, МПа
	Температура T, °C	Тиск P, Па	Час азотування τ, год	Вміст азоту N_2 в суміші, %					
1	560	235	3	100	6100	210	5,76	24,03	-160,2
2	560	235	3	75	9500	220	8,12	33,86	-225,2
3	560	235	3	50	5050	200	4,7	19,76	-138,4

Аналіз даних, які наведені в таблиці 1, показує, що в азотованому шарі виникають залишкові напруження стиску. Властивості азотованого шару та середнє значення залишкових напружень в азотованому шарі залежать від технологічних параметрів процесу іонного азотування і, в даному випадку, від процентного вмісту азоту в суміші з аргоном. Очевидним є те, що при зміні інших технологічних

параметрів залишкові напруження і властивості азотованого шару будуть змінюватися. Це свідчить про можливість керування величиною залишкових напружень в азотованому шарі з допомогою зміни режимів іонного азотування. Тобто, в залежності від умов експлуатації конструкційних елементів величину залишкових напружень можна оптимізувати для отримання максимальних експлуатаційних характеристик.

З метою порівняння величини залишкових напружень, що визначалися за запропонованим способом, і за формулою (1) при вимірюванні прогину пластини з використанням рівняння пружної лінії для балки, проведено іонне азотування пластин із сталі 40Х товщиною 3 мм і довжиною 240 мм за аналогічними режимами, що наведені в таблиці 1. Результати вимірювань прогину та розрахунків за формулою (1) наведені в таблиці 2. Порівнюючи величини середніх залишкових напружень в табл. 1 і 2, бачимо, що різниця не перевищує 2,5%, що свідчить про добру збіжність результатів і прийнятність запропонованого способу визначення залишкових напружень в азотованих шарах.

Відомо [1], що в азотованих шарах твердість та модуль пружності пов'язані з структурою матеріалу і зменшуються по товщині від поверхні в глибину за експоненціальною залежністю. Залишкові напруження в азотованому шарі також пов'язані з його структурою і розподіляються по товщині покриття нерівномірно. Для визначення розподілу залишкових напружень по товщині азотованого шару запропонована формула (8), з використанням якої одержані графіки (рис. 2) за даними табл. 1. З графіків видно, що максимальні залишкові напруження стиску виникають на поверхні, зменшуються по товщині азотованого шару за експоненціальною залежністю і досягають мінімального значення на границі з основою.

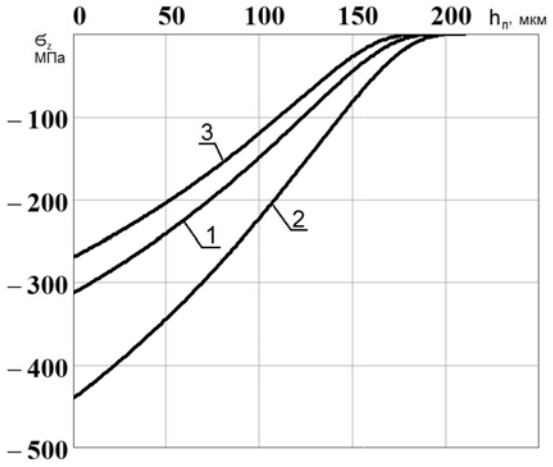


Рис. 2. Розподіл залишкових напружень в азотованому шарі сталі 40Х після іонного азотування в різних середовищах (1 – 100%N_2; 2 – 25%Ar + 75%N_2;3 – 50%Ar + 50%N_2) при постійних значеннях інших факторів (Т = 560°С; р = 265 Па; τ=3 год)

Таблиця 2

Залежність середніх залишкових напружень в сталі 40Х після різних режимів іонного азотування з використанням рівняння (1) пружної лінії для балки

Режим азотування	Технологічні параметри				Мікротвердість H_{100}, МПа	Товщина покриття $h_п$, мкм	Прогин f, мм	Товщина основи H_0, мм	Середні залишкові напруження σ, МПа
	Температура Т, °С	Тиск P, Па	Час азотування τ, год	Вміст азоту N_2 в суміші, %					
1	560	235	3	100	6100	210	0,81	2,790	-162,2
2	560	235	3	75	9500	220	1,15	2,780	-230,3
3	560	235	3	50	5050	200	0,70	2,800	-140,2

Таблиця 3

Розподіл залишкових напружень по товщині азотованого шару після іонного азотування сталі 40Х за різними режимами

Віддаль від поверхні покриття	Запропонований спосіб			Метод Давиденкова М.М.			Відхилення від методу Давиденкова М.М., %		
	Режим			Режим			Режим		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	-312	-440	-269	-300	-450	-250	4	2	8
25	-278	-395	-238	-290	-425	-238	4	7	0
50	-240	-344	-203	-260	-375	-208	8	8	2
75	-197	-286	-164	-210	-290	-157	6	1	4
100	-148	-222	-115	-145	-208	-100	2	7	15
125	-96	-152	-71	-94	-140	-63	2	9	13
150	-48	-81	-29	-55	-80	-35	13	1	17
175	-22	-35	-10	-26	-40	-12	15	13	17
200	-5	-10	0	-5	-12	0	0	17	0

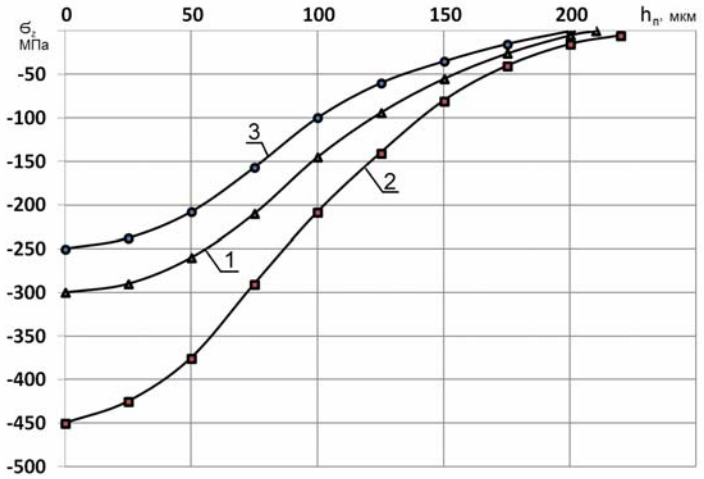


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень в азотованому шарі сталі 40Х після іонного азотування в різних середовищах (1 – 100%N2; 2 – 25%Ar + 75%N2;3 – 50%Ar + 50%N_2) при постійних значеннях інших факторів (Т = 560°С; р = 265 Па; t=3 год)

На рис. 3 і табл. 3 показані графіки зміни залишкових напружень та величини по товщині азотованих шарів в пластинах із сталі 40Х після іонного азотування за різними режимами (табл. 1), що визначалися за методом М.М. Давиденкова [5] і формулою (3).

Порівнюючи графіки рис. 2 і 3, бачимо,що вони близькі за характером зміни та величиною залишкових напружень по товщині азотованого шару. Різниця абсолютних значень залишкових напружень в відповідних тачках азотованого шару (табл. 3), визначених за запропонованим способом і методом М.М. Давиденкова, є не значною, а відхилення в верхніх шарах дифузійного покриття між ними не перевищує 8 %.

Висновки

Таким чином, на основі проведених досліджень показано, що в азотованих шарах виникають залишкові напруження стиску, величиною яких можна керувати за рахунок зміни технологічних параметрів процесу азотування.

Запропонований спосіб визначення залишкових напружень в азотованих шарах дає результати, що близькі до існуючих в літературі способів, і є прийнятним для експериментальних досліджень розподілу залишкових напружень по товщині дифузійних покриттів. Даний спосіб характеризується простотою і не вимагає складного обладнання.

Література

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

2. Береговенко А.Ю. Влияние азотирования на демпфирующие свойства некоторых металлических материалов / А.Ю. Береговенко, В.Г. Каплун, А.П. Яковлев, И.М. Пастух // Проблемы прочности. – 1993. – № 8 – С. 73–77.

3. Самойлов Л.И. Определение термических напряжений в бездиффузйонйых жаростойких покрытиях системы (Со) СА / Л.И. Самойлов, И.А. Игнатов, А.М. Воробьев, В.С. Козлова // Заводская лаборатория. – 1984. – № 21. – С. 18–22.

4. Барвинок В.А. Определение остаточных напряжений в покрытиях плазменного напыления / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, Ф.И. Катаев и др. // Сварочн. производство. – 1981. – № 5. – С. 11–15.

5. Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений / Н.Н. Давиденков // Заводская лаборатория. – 1937. – № 8. – С. 987–990.

6. Карпенко Г.В. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий / Г.В. Карпенко, В.И. Похмурский, В.Б. Далисов, В.С. Замиховский. – Киев : Наук, .пумка, 1971. – 167 с.

7. Биргер И.А. Остаточные напряжения / Биргер И.А. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.

8. 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.

9. 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 металлов. – 1968. – Т. 4. – № 4. – С. 381–383.

10. Каплун В.Г. Коррозионная стойкость стали 45Х, азотированной в тлеющем разряде / В.Г. Каплун, А.Е. Рудык, Я.Н. Гладкий, М.С. Стечишин // Защитные покрытия на металлах. – 1987. – Вып. 21. – С. 75–77.

11. 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.

12. 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.

13. Teixeira V. Residual stress and cracking in thin PVD coatings / V. Teixeira // Vacuum. – 2002. – V. 64, № 3-4. – С. 393–399.

14. The interrelationship between internal stress, processing parameters and microstructure of physically vapour deposited and thermally sprayed coatings / D.S. Rickerby, G. Eckold, K.T. Scott / Thin Solid Films. – 1987. – V. 154, № 1-2. P. 125–141.

15. Пат. 101477030 CN. G01N19/04. Measuring method for residual stress in coating / Binshi Xu, Xiancheng Zhang, Haidou Wang; Yixiong Wu. – № 200810055923.1 ; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 08.07.2009.

16. Пат. 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

17. А.с. 1805307. G01L1/00. Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках / Колмогоров Г.Л. – № 4888114/28 ; заявл. 06.12.1990 ; опубл. 30.03.1993 ; Бюл. № 12.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Каплун В.Г.

УДК 669.1:537.5

І.М. ПАСТУХ, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ
Хмельницький національний університет

ВНУТРІШНІ ЛОКАЛЬНІ ВИНЯТКИ ПОВЕРХНІ, АЗОТОВАНОЇ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Кваліфіковані типи локальних винятків поверхні, розглянуто їх вплив на концентрацію електричного поля та її зміну як фактор нерівномірності результатів модифікації. Введено критерій концентрації поля, вирішена аналітична задача взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля. Досліджено вплив розмірів внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Результати досліджень можуть бути використані для точного визначення розподілу густини струпу по поверхні як параметра технологічного режиму.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, поверхня, внутрішні локальні винятки.

I.M. PASTUKH, V.V. LUHOVEC
Khmelnytsky National University

INSIDE LOCAL EXCEPTIONS OF SURFACE NITRIDING BY GLOW DISCHARGE

The kinds of local exceptions of surface are qualified. Their influence on the concentration of the electric field and its change as a factor of the uneven modification results is considered. The criterion of concentration field is established. Analytical problem of relationship of surface geometry and parameters of the electric field is solved. The influence of the internal local exceptions size to the concentration of the electric field is investigated. The research results can be used for accurately determination of the current density distribution on the surface as a parameter of technological regime. The proposed analytical apparatus can be used for calculating the parameters of the electric field concentration in a glow discharge, which is used for the surface modification of metal parts.

Keywords: nitriding, glow discharge, surface, internal local exceptions.

Вступ

Розподіл густини струму по металевій поверхні, яка модифікується азотуванням в тліючому розряді, відіграє суттєву роль насамперед як параметр режиму, котрий відноситься до групи енергетичних характеристик технології. Наявність локальних винятків поверхні – як зовнішніх у вигляді гострих ребер, виступів, тощо, так і внутрішніх, що мають форму пазів, отворів – призводить в цих місцях до концентрації поля і густини струму. В свою чергу локальне підвищення передачі енергії, яке характерне для локальних виняткiв, обумовлює більш інтенсивне порівняно з рештою поверхні її нагрівання. Негативні наслідки подібного ходу процесу можуть призвести до місцевого перегрівання поверхні, відтак – до відпуску, зниження фізико-механічних показників модифікованої деталі. До подібних же наслідків призводить також більша порівняно з іншою частиною поверхні швидкість нагрівання садки.

Теоретичні основи взаємодії електричного поля із зовнішніми локальними винятками поверхні розглянуті в [1, 2]. Стосовно питань, пов'язаних з теорією внутрішніх локальних виняткiв поверхні, там же наводяться тільки самі загальні відомості про них та основні принципи вирішення задачі. З цієї причини головною метою цієї роботи є розробка аналітичних основ взаємодії електричного поля з внутрішніми локальними винятками поверхні. При цьому в якості моделі вибрано найбільш загальний варіант – внутрішній локальний виняток клиновидної форми. Пази прямокутного перетину, отвори відносно малого діаметра становлять окремий, більш простий варіант прийнятої до розгляду схеми.

Постановка завдання

Як зазначалось вище, в найбільш ускладненому варіантові внутрішні локальні винятки поверхні, що призводять до суттєвої концентрації електричного поля, мають форму клиновидного паза (рис. 1), причому розміри його, особливо ширина на вході, порівнянні з шириною області катодного падіння (ОКП). В залежності від цього співвідношення ОКП всередині паза може частково або навіть повністю (в напрямку глибини паза) взаємно перекриватись. Введемо поняття зон повного (А), часткового (В) перекриття та зони звичайного розряду (С). Характер перекриття, як буде показано вище, відіграє суттєву роль у визначенні траєкторії руху електронів, які вилетіли з поверхні, оскільки в зонах А та В вини перебувають під силовим впливом одночасно двох полів від двох стінок паза. Рухаючись в проміжку між цими стінками під впливом просторової системи сил, електрони можуть перетинати лінію симетрії паза, тобто траєкторія їх руху відповідає в певній мірі коливальному рухові, що суттєво збільшує довжину шляху, котрий пройде електрон в порівнянні з рухом по нормалі до поверхні в ОКП звичайного розряду. Відповідно цьому зростає ймовірність іонізаційних процесів, що в свою чергу призводить до локального зростання струму розряду.

Очевидно, що співвідношення довжин зон перекриття суттєво змінюється залежно від порівняння ширини паза з шириною ОКП δ. Критичною межею є відношення рівності половини ширини паза b та ширини ОКП, при якому весь внутрішній простір паза є зоною повного перекриття.

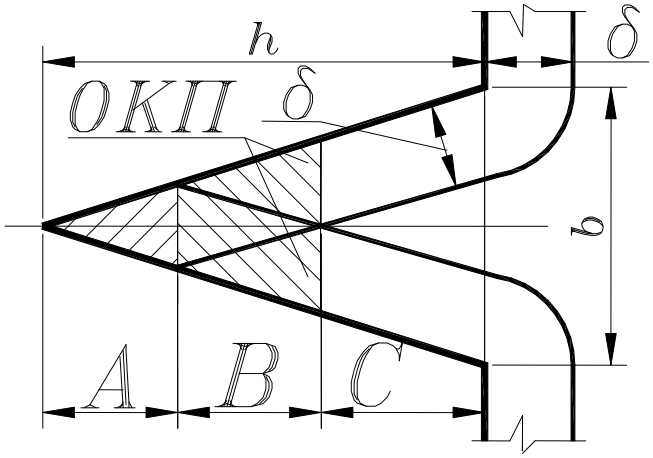


Рис. 1. Схема внутрішнього локального винятку поверхні (А – зона повного перекриття розряду, В – часткового, С – звичайного розряду)

При переході до паза прямокутної форми або отвору слід врахувати особливості перекриття ОКП, а також відомий з літератури по розряду з пустотілим катодом факт стосовно розподілу електричного поля вздовж паза. Мається на увазі встановлений експериментально розподіл поля на глибину не більше подвійної ширини паза (двох діаметрів отвору) [3].

Аналітична модель внутрішніх локальних винятків поверхні

Розрахункова схема внутрішнього локального винятку поверхні у вигляді клиноподібного паза показана на рис. 2.

Розміри паза співвідносяться

$$b/2h = tg\ \phi/2\text{, звідки}\quad \phi = arctg\ b/2h\ .$$

Рівняння верхньої грані паза $y = x \cdot tg\ \phi/2$, нижньої $y = x \cdot (-tg\ \phi/2) = x \cdot tg(-\phi/2)$.

В зонах повного або часткового перекриття полів на електрон, який вилетів з будь-якої точки на грані (наприклад – з нижньої) і початкові координати якої x_0, y_0, можуть одночасно діяти три електричних поля: поперечні від двох граней E_1 і E_2 та поздовжнє E_a. Враховуючи прийнятий лінійний закон розподілу напруженості поперечних полів $E(x)$ та параболічний закон зміни падіння напруги в ОКП – $U(x)$ [1], напруженості поля визначаються

$$E_1 = \frac{2U_K}{\delta}\left(1 - \frac{r_1}{\delta}\right),$$

$$E_2 = \frac{2U_K}{\delta}\left(1 - \frac{r_2}{\delta}\right).$$

$$E_a = \frac{2U_K}{\Delta_B}\left(1 - \frac{x}{\Delta_B}\right),$$

де U_K – катодне падіння напруги,

δ – ширина ОКП,

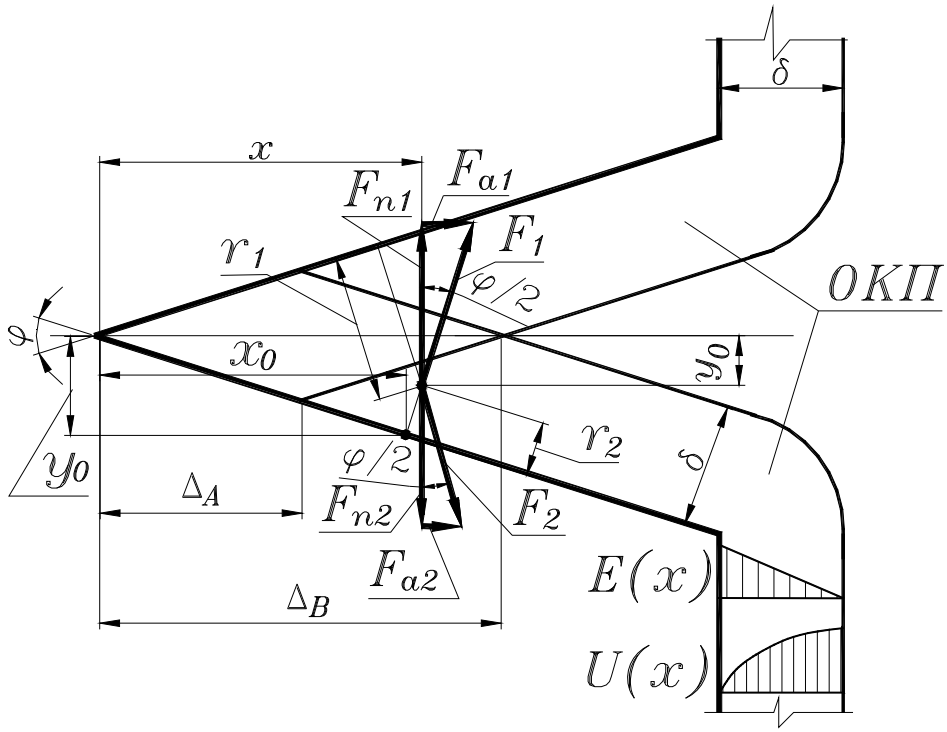


Рис. 2. Розрахункова схема внутрішнього локального винятку поверхні

r_1, r_2 – поточні відстані від електрона до граней паза,

Δ_B – відстань від вершини паза до межі області часткового перекриття,

$$\Delta_B = \frac{\delta}{\sin\left(arc\,tg(b/2h)\right)} \ .$$

Поточні відстані від електрона до граней визначаються

$$r_1 = \frac{0,5bx + hy}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + h^2}} \ , \quad r_2 = \frac{-0,5bx + hy}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + h^2}} \ .$$

Поздовжня сила, яка діє не електрон

$$F_a = q_e E_a \,,$$

де q_e – заряд електрона.

Результуюча сила, яка діє на електрон в поперечному напрямку

$$F_n = F_{n1} - F_{n2} = F_1 \cos\frac{\phi}{2} - F_2 \cos\frac{\phi}{2} = q_e \cdot \cos\frac{\phi}{2}\left(\frac{2U_K}{\delta}\left(\frac{r_2}{\delta} - \frac{r_1}{\delta}\right)\right).$$

Результуюча сила в поздовжньому напрямку

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} + q_e E_a = F_{n1} \sin\frac{\phi}{2} + F_{n2} \sin\frac{\phi}{2} + q_e \frac{2U_K}{\Delta_B}\left(1 - \frac{x}{\Delta_B}\right).$$

Сума проекцій всіх сил, які діють в горизонтальному напрямку

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} + q_e E_a = F_{n1} \sin\frac{\phi}{2} + F_{n2} \sin\frac{\phi}{2} + q_e \frac{2U_k}{\Delta_B}\left(1 - \frac{x}{\Delta_B}\right).$$

Сума проекцій всіх сил на горизонтальну вісь

$$\sum X_i = m_e \frac{d^2x}{dt^2} = F_a \,.$$

Сума проекцій всіх сил на вертикальну вісь

$$\sum Y_i = m_e \frac{d^2y}{dt^2} = F_n \,.$$

Двічі інтегруючи, отримаємо для горизонтальної вісі

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_a}{m_e}; \qquad \frac{dx}{dt} = \frac{F_a}{m_e} t + C_1; \qquad x = \frac{F_a}{2m_e} t^2 + C_1 t + C_2 \,.$$

Аналогічно для вертикальної вісі

$$\frac{d^2y}{dt^2}=\frac{F_n}{m_e};\qquad \frac{dy}{dt}=\frac{F_n}{m_e}t+C_3;\qquad y=\frac{F_n}{2m_e}t^2+C_3t+C_4\,.$$

Сталі інтегрування визначаються, якщо врахувати, що при t=0,

$$\frac{dx}{dt}=0;\quad x=x_0;\ C_2=x_0;\ C_1=0;\ x=\frac{F_at^2}{2m_e}+x_0\,,$$

$$\frac{dy}{dt}=0;\quad y=y_0;\ C_4=y_0;\ C_3=0;\ y=\frac{F_nt^2}{2m_e}+y_0\,.$$

Коефіцієнт концентрації поля визначається як відношення сумарної довжини траєкторій електронів в межах зони перекриття до сумарної довжини траєкторій електронів на плоскій ділянці лінії грані, довжина якої

$$\frac{\delta}{tg\left(\phi/2\right)}.$$

Якщо врахувати, що

$$t^2=\frac{1}{\frac{F_a}{2m_e}}\left(x-x_0\right)=\frac{1}{\frac{F_n}{2m_e}}\left(y-y_0\right),$$

то

$$\frac{2m_e}{F_a}\left(x-x_0\right)=\frac{2m_e}{F_n}\left(y-y_0\right);\quad \frac{\left(x-x_0\right)}{F_a}=\frac{\left(y-y_0\right)}{F_n};\ \frac{y}{F_n}=\frac{\left(x-x_0\right)}{F_a}+\frac{y_0}{F_n}\,,$$

звідки

$$y(x)=\frac{F_n}{F_a}\left(x-x_0\right)+y_0\,.$$

Таким чином, коефіцієнт концентрації поля для внутрішніх локальних винятків в формі клиноподібного паза

$$K_E=\frac{1}{\delta}\int_0^{\delta/tg(\phi/2)}\left(\int_{X_0}^{\Delta_B}\sqrt{1+\left(\frac{d\left(y\left(x\right)\right)}{dx}\right)^2}\,dx\right)dX\,.$$

Висновки

Запропонований аналітичний апарат може застосовуватись для розрахунку показників концентрації електричного поля в тліючому розряді, який використовується для поверхневої модифікації металевих деталей.

Література

1. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.

2. Пастух І. М. Зовнішні локальні винятки металевих поверхонь та їх вплив на параметри режиму модифікації / І. М. Пастух // Вісник ТУП, Хмельницький, 2001, №3, ч. 1, Технічні науки, с. 43-47.

3. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом / Москалев Б. И. – М. : Энергия, 1969. – 184 с.

Рецензія/Peer review : 30.10.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 621.793.6

П.В. МАТВІЇШИН
ВП НУБіП України "Бережанський агротехнічний інститут", Україна

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ АРГОНУ І ТИСКУ НА ВЛАСТИВОСТІ АЗОТОВАНОГО ШАРУ ПРИ ІОННОМУ АЗОТУВАННІ

В статті наведені результати експериментальних досліджень властивостей азотованого шару після іонного азотування в безводневих середовищах залежно від величин концентрації аргону в насичуючому середовищі в суміші з азотом та величини тиску в вакуумній камері. На прикладі азотування сталі 38ХМЮА показано вплив цих технологічних параметрів процесу іонного азотування на твердість і товщину азотованого шару і можливість керування цими характеристиками в широких межах.

Ключові слова: азотування, аргон, тиск, азотований шар, твердість.

P.V. MATVIISHIN
The separated subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Berezhany agrotechnical institute", Ukraine

CARBON EFFECT CONCENTRATION AND PRESSURE ON PROPERTIES OF NITRIDED LAYER ION NITRIDING

Abstract – The article presents the results of experimental investigations of the properties of the nitrided layer after ion nitriding in hydrogen environments without depending on the quantities of argon concentration in the saturating environment in a mixture of nitrogen and the pressure in the vacuum chamber. For example, nitriding steel 38HMYUA the influence of technological parameters of ion nitriding the hardness and thickness of the nitrided layer and control over these characteristics in a wide range

Key words: nitriding, argon, pressure, nitrided layer, hardness.

Іонне азотування є ефективною технологією модифікації поверхні матеріалів, що дозволяє за рахунок зміни технологічних параметрів процесу азотування змінювати фізико-механічні властивості, структуру, хімічний і фазовий склади поверхневого шару конструкційних елементів та впливати на їх експлуатаційні характеристики в значному діапазоні [1–6]. Такими технологічними параметрами процесу іонного азотування є тиск в вакуумній камері, склад насичуючого середовища, температура і час дифузійного насичення. Кожний з цих технологічних параметрів має суттєвий вплив на властивості азотованого шару. В техніці застосовуються технології іонного азотування в водневих середовищах (аміаку або суміші азоту з воднем) [1, 2] та безводневих середовищах (суміші азоту з аргоном) [3, 4]. Безводневі технології іонного азотування мають ряд переваг, так як виключають водневу крихкість металів, скорочують витрати електроенергії і є екологічно чистими [3, 4].

Процес іонного азотування супроводжується двома конкуруючими процесами – адсорбції і зворотного катодного розпилення на поверхні, що охоплюється плазмою тліючого розряду. Від співвідношення цих процесів залежить фазовий склад і властивості азотованої поверхні. Аргон, маючи атомну вагу 40, яка в 2,8 раз перевищує атомну вагу азоту, інтенсифікує процес катодного розпилення з поверхні азотування і тим більше, чим більша його концентрація. В зв'язку з цим на поверхні можуть утворюватися різні фази нітридів та твердий розчин азоту в металі, що обумовлює різну твердість азотованої поверхні. Слід відзначити, що вплив концентрації аргону на твердість поверхні азотованого шару для різних матеріалів різний і залежить від хімічного складу сталі та інших технологічних параметрів технологічного процесу іонного азотування.

Нами проведені експериментальні дослідження впливу аргону в насичуючій суміші з азотом та тиску в вакуумній камері на твердість і товщину азотованого шару при іонному азотуванні в безводневих середовищах сталі 38ХМЮА при зміні концентрації аргону від 0 до 90 об.% та зміні тиску від 160 до 355 Па. Дослідження впливу аргону на властивості азотованого шару проводилися при різних температурах і постійних значеннях тису і часу азотування.

Дослідження впливу тиску на властивості азотованого шару проводилися з використанням планування експериментів двох факторного рототабельного плану другого порядку (план Бокса) [7]. В процесі досліджень змінювалися такі фактори: температура в межах 500–620 °С, тиск у вакуумній камері в межах – 125–355 Па. Тривалість азотування та вміст аргону у газовому середовищі фіксувалися, і становили відповідно 480 хв та 25 % Ar. Ці параметри вибрані з умови забезпечення максимальної товщини і твердості азотованого шару для сталі 38ХМЮА на основі попередніх досліджень, якими було встановлено, що товщина азотованого шару залежно від часу азотування змінюється за параболічною залежністю і після 8 год дифузійного насичення практично не змінюються. Залежність поверхні азотованого шару сталі 38ХМЮА від вмісту аргону в насичуючому середовищі має екстремальний характер з максимумом при 25 %Ar.

Для отримання моделі використовувався алгебраїчний поліном другого порядку [7]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, \quad (1)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії;

x_1, x_2 – величини, які залежать від змінних факторів.

Для запису умов експерименту і обробки експериментальних даних рівні факторів кодувались.

Прийняті такі змінні фактори:

X_1 – температура азотування;

X_2 – тиск в вакуумній камері.

При кодуванні значень X_1 і X_2 верхній рівень позначають +1, нижній –1, а нульовий 0. Кодування фактора X_i визначається виразом:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (2)$$

де i – номер фактора;

X_i – натуральне значення i-го фактора;

X_{0i} – натуральне значення нульового рівня i-го фактора;

ε_i – інтервал зміни i-го фактора.

Експериментальні дослідження проводились на рівнях та з інтервалами, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Рівні та інтервали зміни факторів

Позначення	Фактор	***Рівень варіювання***					Інтервал варіювання ε
		–1,414	–1	0	+1	+1,414	
X_1	Температура, °С	500	520	560	600	620	40
X_2	Тиск, Па	125	160	240	320	355	80

Матриця плану для композиційного рототабельного планування другого порядку наведена в таблиці 2.

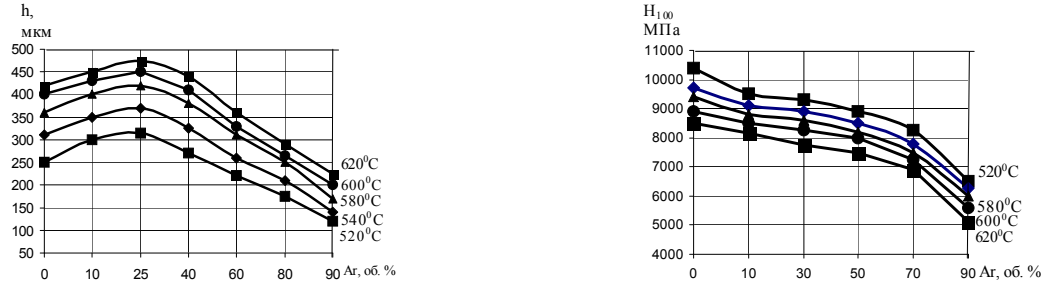
Таблиця 2

Матриця рототабельного планування експерименту

Номер досліду	Матриця планування		Робоча матриця	
	X_1	X_2	T, °С	P, Па
1	+	+	600	320
2	–	+	520	320
3	+	–	600	160
4	–	–	520	160
5	–1,414	0	500	240
6	+1,414	0	620	240
7	0	–1,414	560	125
8	0	+1,414	560	355
9	0	0	560	240
10	0	0	560	240
11	0	0	560	240
12	0	0	560	240
13	0	0	560	240

Після проведення експерименту за рототабельним планом другого порядку, отримали значення мікротвердості поверхні. Значення були перевіренні на однорідність дисперсій похибок за критерієм Кохрена. Коефіцієнти рівняння регресії знаходилися за допомогою матричного методу, а також перевірялась їх значимість по довірчих границях за допомогою критерію Стьюдента при п’яти процентному рівні значимості.

На рис. 1 наведені залежності властивостей поверхневих шарів сталі 38ХМЮА від процентного вмісту аргону в насичуючому середовищі в суміші з азотом при різних температурах азотування, часі дифузійного насичення 8 год і тиску в вакуумній камері 240 Па. З рис. 1 *а* видно, що існує оптимальне значення процентного вмісту аргону в насичуючому середовищі в суміші з азотом (25 об.% Ar), при якому досягається найбільша товщина азотованого шару і максимальне значення при температурі 620 °С. Мікротвердість азотованого шару зменшується зі збільшенням процентного вмісту аргону в суміші з азотом при всіх температурах азотування.



а *б*

Рис. 1. Залежність товщини азотованого шару (*а*), твердості поверхні (*б*) сталі 38ХМЮА від вмісту аргону в насичуючому азотно-аргонному середовищі при різних температурах дифузійного насичення на протязі 8 год і тиску в вакуумній камері 240 Па

Результати експериментальних досліджень властивостей азотованих шарів сталі 38ХМЮА після азотування за різними режимами відповідно до плану Бокса наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень властивостей поверхневого шару сталі 38ХМЮА після азотування в тліючому розряді в безводневих середовищах

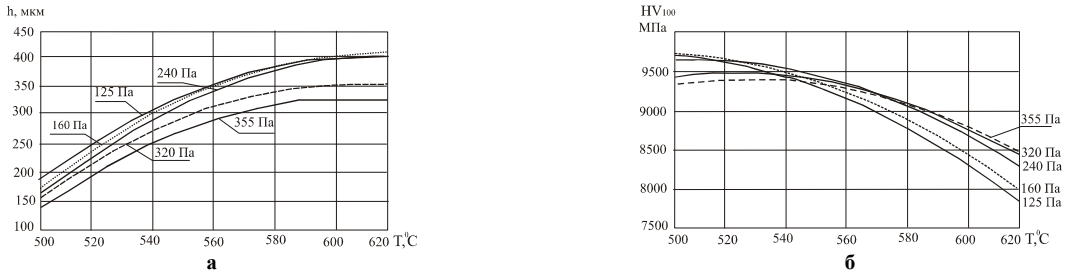
Номер режиму азотування	Робоча матриця		Мікро-твердість H_{100}, МПа	Товщина азотованого шару		Градієнт твердості по товщині МПа/мкм
	T, °C	*P*, Па		Нітридної зони h_N, мкм	Дифузійної зони $h_д$, мкм	
1	600	320	8940	3,0	400	21,9
2	520	320	9350	6,0	240	32,2
3	600	160	8600	6,2	360	20,0
4	520	160	9520	7,0	230	31,7
5	500	240	9800	10,0	180	38,1
6	620	240	8030	1,0	410	17,9
7	560	125	9100	4,0	290	25,3
8	560	355	9200	5,0	360	26,3
9	560	240	9300	6,0	350	25,8
10	560	240	9350	5,5	365	28,3
11	560	240	9310	4,5	360	28,2
12	560	240	9290	5,0	355	28,1
13	560	240	9300	3,5	350	28,4

На основі результатів експериментальних досліджень відповідно, до двох факторного рототабельного плану, отримані емпіричні математичні залежності товщини азотованого шару (3) і твердості поверхні (4) сталі 38ХМЮА від температури і тиску, при постійних значеннях інших параметрів азотування (τ = 8 год, і вмісту аргону 25 %Ar). На основі цих математичних залежностей наведені графіки (рис. 2) зміни вказаних вище параметрів.

$$h = 356{,}1 + 76{,}9x_1 + 18{,}6x_2 + 7{,}5x_1x_2 - 31{,}4\left(x_1\right)^2 - 16{,}4\left(x_2\right)^2 \quad (3)$$

$$H_{100} = 9310{,}2 - 479{,}1x_1 + 38{,}9x_2 + 127{,}5x_1x_2 - 188{,}0\left(x_1\right)^2 - 70{,}5\left(x_2\right)^2 \quad (4)$$

З рис. 2*а* видно, що товщина азотованого шару зростає зі збільшенням температури азотування і зменшенням тиску у вакуумній камері. Це обумовлено зростанням енергії іонів азоту при такому характері зміни даних технологічних параметрів. Проте твердість поверхневого шару, навпаки, зменшується при збільшення температурі і зменшення тиску в вакуумній камері (рис. 2*б*).



а **б**

Рис. 2. Залежність товщини азотованого шару (*а*) і твердості поверхні (*б*) від температури дифузійного насичення при різних тисках в вакуумній камері

Таким чином, проведені дослідження властивостей азотованого шару при азотуванні в тліючому

розряді в безводневих середовищах сталі 38ХМЮА показали, що їх можна змінювати в широких межах з допомогою технологічних параметрів процесу азотування.

Література

1. Арзамасов Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. З. Баумана, 1999. – 400 с.

2. Лахтин Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.

3. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Харьков : НЕЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.

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

5. Береговенко А.Ю. Влияние азотирования на демпфирующие свойства некоторых металлических материалов / А.Ю. Береговенко, В.Г. Каплун, А.П. Яковлев, И.М. Пастух // Проблемы прочности. – 1993. – № 8. – С. 73–77.

6. Матвіїшин П.В. Дослідження зносостійкості пар тертя в середовищі скло наповнених пластмас / П.В. Матвіїшин, В.Г. Каплун // Проблеми трибології (Promblems of Tribology). – 2009. – № 4. – С. 80–85.

7. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента / Владислав Борисович Тихомиров – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

Рецензія/Peer review : 27.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Каплун В.Г.

УДК 004.4:621.894

В.О. СЛАЩУК, О.О. СЛАЩУК
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ПЛЯМ ФРЕТИНГ-КОНТАКТУ ДВОХ СПРЯЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В даній роботі представлений опис спеціалізованого програмного забезпечення, за допомогою якого можна проводити аналіз зображень плям фретинг-контакту будь-якої конфігурації. Програмне забезпечення дозволяє отримувати числові характеристики площі контакту без застосування додаткових вимірювальних пристроїв.

Ключові слова: програмне забезпечення, контакт, фретинг, контактна площина*.*

V. O. SLASHCHUK, O.O. SLASHCHUK
Khmelnytsky National University

ANALYSIS SPOTS OF FRETTING WEAR OF TWO CONTACT SURFACES BY USING SPECIALIZED SOFTWARE

Abstract – The aim of the research – to develop a convenient way to analyze the results of wear of contact surfaces. This paper presented a description of specialized software what help to analyze spots of fretting wear of two contact surfaces of any configuration. Software enables get numerical characteristics of contact area without using of additional measuring devices. Main difficulty of analyze is heterogeneity of destruction contact spot. The authors propose to conduct image segmentation of contact surface and separately calculate areas of destruction. Segmentation is dependent on the brightness of pixels. Thus, developed software makes it possible to analyze areas of damaged surfaces regardless of the type of contact and method of load.

Keywords: software, contact, fretting, contact plane.

Вступ

Актуальною проблемою для дослідників, що працюють над вирішенням задачі протидії фретинг-зношуванню та підвищенню зносостійкості контактуючих поверхонь є аналіз результатів руйнування в зонах контакту. Це питання піднімається в галузях машинобудування, авіа- і космічної техніки, трибології, геофізики, будівельної індустрії, біомеханіки, тощо.

Протидія руйнування поверхні конструкційних матеріалів під дією знакозмінних тангенційних навантажень лишається актуальним в області забезпечення цілісності конструкцій та вузлів деталей машин [1].

Однією з головних задач, яку ставлять перед собою науковці, визначення та аналіз ділянок контактної взаємодії. Найбільшою проблемою, яка присутня в процесі аналізу зруйнованих поверхонь – нерівномірне зношування окремих ділянок контактних площин. Це зумовлено хвилястістю та шорсткістю поверхонь, що призводить до руйнувань ділянок в окремих точках.

Розрізняють фактичну, контурну та номінальну площу контакту.

Номінальна контактна площа (НКП) – це площа по якій відбувається реальний дотик поверхонь.

Контурна контактна площина (ККП) – площа, на якій реалізується контакт мікронерівностей,

причому відстань між плямами контакту не перевершують базову довжину, відповідну даній поверхні.

Фактична контактна площина (ФКП) – площина, по якій відбувається контакт мікронерівностей, які утворюють шорсткість.

Методика досліджень

Для вирішення прикладних задач, де руйнування поверхневих шарів відбувається за рахунок знакозмінних тангенціальних навантажень, об'єктивно аналізується дві ділянки площини контакту – НКП та ККП.

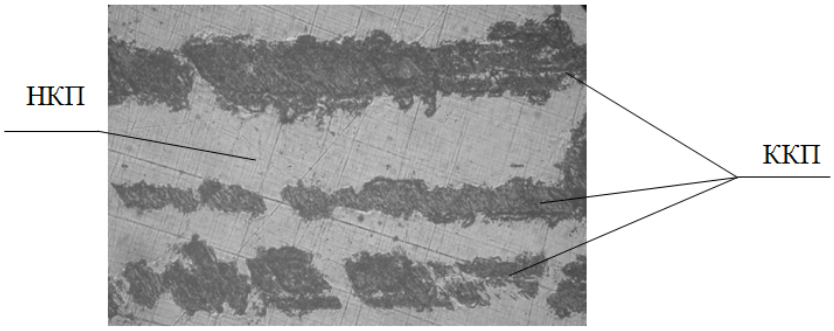


Рис. 1. Номінальна (НКП), контурна (ККП) контактна площина

ФКП завжди в багато разів менше НКП і змінюється від тиску, в той же час номінальна площа залишається постійною. З узагальненого закону тертя випливає, що збільшення фактичної площі контакту при тому ж нормальному тиску призводить до збільшення сили тертя, а отже, і коефіцієнта тертя [2].

Існує декілька методів визначення площини контакту – адгезійний, електричний, геометричний, оптичний, фізико-хімічний. З них найпоширенішими є адгезійний та оптичний.

В основі адгезійного методу лежить принцип нанесення тонких вугільних плівок шляхом розпилення вугільного порошку на поверхню у вакуумі [3]. Перевагою цього методу можна зазначити нанесення дуже тонкої плівки товщиною 0,03…0,04 мкм, що при збільшені може реєструватися візуально за кольором. До негативних аспектів цього методу відноситься загальна складність створення плівки, що вимагає спеціалізованого устаткування [4], а також цей метод не дає точних значень при переміщенні однієї або обох поверхонь контакту при проковзуванні.

Оптичні методи дозволяють безпосередньо спостерігати формування та розширення зони контакту при зношуванні. Недоліком таких методів є необхідність використання одного (або двох) зразка з прозорого оптичного матеріалу для аналізу площин контакту в реальному часі [5].

Перевагами оптичного методу є можливість аналізувати зони контакту як при статичних режимах, коли діють лише нормальні навантаження, так і при взаємних переміщеннях поверхонь контакту (процеси фретинг-зношування в номінально-нерухомих з'єднаннях), коли взаємодія двох поверхонь, у наслідок шорсткості, завжди дискретна, тобто відбувається окремими плямами, що формують ККП [6].

Рисунок 2 наочно демонструє пляму фретинг-контакту кульки з площиною після $30 \cdot 10^5$ циклів. З рисунку видно, що руйнування контактної поверхні не рівномірне. Це ускладнює процес аналізу контактної поверхні.

Особливою задачею контактної взаємодії виступають випадки, коли необхідно врахувати локальне проковзування з тертям на поверхнях налягання, оскільки при цьому ні область локалізації просвітів, ні ділянок проковзування і зчеплення заздалегідь невідомі і залежать від прикладених навантажень.

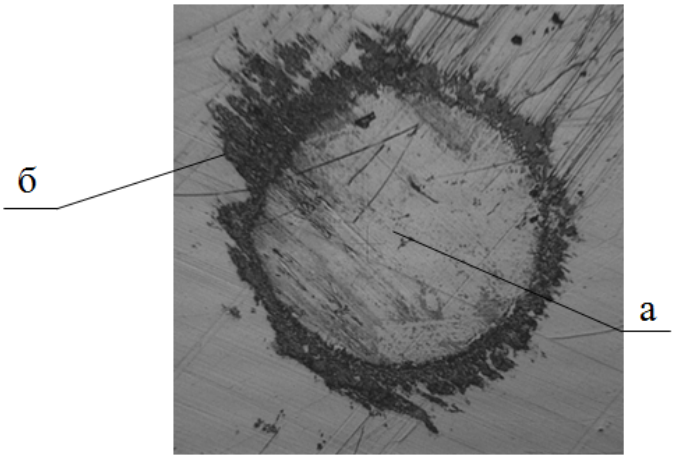


Рис. 2. Пляма контакту кулька-площина (ШХ-15 – СТАЛЬ 45) після $30 \cdot 10^5$ циклів:

а – центральна зона зчеплення; б – периферійна зона проковзування

Збільшення тангенційного навантаження приводить до зменшення зони зчеплення і при деякому значенні зсувного зусилля відбувається відносне зміщення всієї контактної поверхні. Оскільки фретинг спостерігається при амплітудах менших за елементарну площадку контакту, це призводить до структурної пристосовуваності поверхонь, тобто їх фрикційне руйнування буде відбуватись з перших циклів відносного руху [7].

Оптичний метод дуже зручно використовувати для переведення отриманих значень по площинах

контакту в звичні величини (мкм^2). Для цього на об'єктив мікроскопа встановлюють лінзу, що розбита на області з визначеною стороною. Далі підраховують кількість областей в які потрапляє ділянка зразка, яка перебувала в контакті. Процес підрахунку областей досить складний і потребує вдосконалення.

Авторами пропонується сучасний метод, який дає можливість оптимізувати оптичний метод і полегшити аналіз окремих ділянок плям контакту.

В основі методу, для аналізу плям контакту, використовується цифрове зображення площини з видимими ділянками руйнування [8].

За своєю структурою оксиди металів, які виступають у якості елементів зношування мають темно-коричневе та чорне забарвлення і осідають по краях зони контакту, утворюючи контури плями. В середині цього контуру знаходиться ділянка зчеплення, що має світле забарвлення [9]. Разом ці ділянки формують НКП.

Виходячи з цього, для аналізу плями контакту на зображенні необхідно відокремити світлі частини від темних – провести сегментацію зображення на окремі ділянки, які утворюються набором пікселів, спільних за певним ознаками. Сегментацію зазвичай використовують для виділення на зображеннях меж об'єктів будь-якої складності.

Для моделей документа – RGB зображення представляється у вигляді накладання червоного, зеленого та синього каналу один на одного, утворюючи кольорове зображення. При цьому кольори змішуються адитивно наче промені світла. Це означає, що при накладанні наступного шару результат буде освітлюється. Чим світліший канал тим більше базового кольору міститься на зображенні.

Для визначення яскравості пікселя, при переводі кольорового зображення в монохромне, можна скористатися ваговими коефіцієнтами його кольору, провівши розрахунки за наступною формулою:

$$\text{Яскравість} = R \cdot 0{,}3 + G \cdot 0{,}59 + B \cdot 0{,}11$$

де R – значення червоного каналу, G – значення зеленого каналу, B – значення синього каналу.

Відтінки на цифровому зображенні характеризуються яскравістю пікселів. Цей показник знаходиться в діапазоні від 0 до 255. Найтемнішому відтінку відповідає показник зі значенням 0, найяскравішому – 255.

Програмний продукт реалізований об'єктно-орієнтованою мовою програмування C Sharp(C#) під платформу Microsoft .NET Framework.

Програма аналізує кожен піксель зображення і виокремлює його як частину контактної плями або як фон, використовуючи яскравість кожного пікселя.

Для того щоб виокремити фон від плями задається критерій сегментації, тобто значення яскравості до якої піксель визначається як темний, що є частиною плями контакту, та після якої він є світлим – фоном зображення. Також аналізуються світлі пікселі, що знаходяться між двома темними, які утворюють ділянку схоплення.

Провівши підрахунок кількості світлих та темних пікселів, програма перетворює їхню кількість в мікрометри,

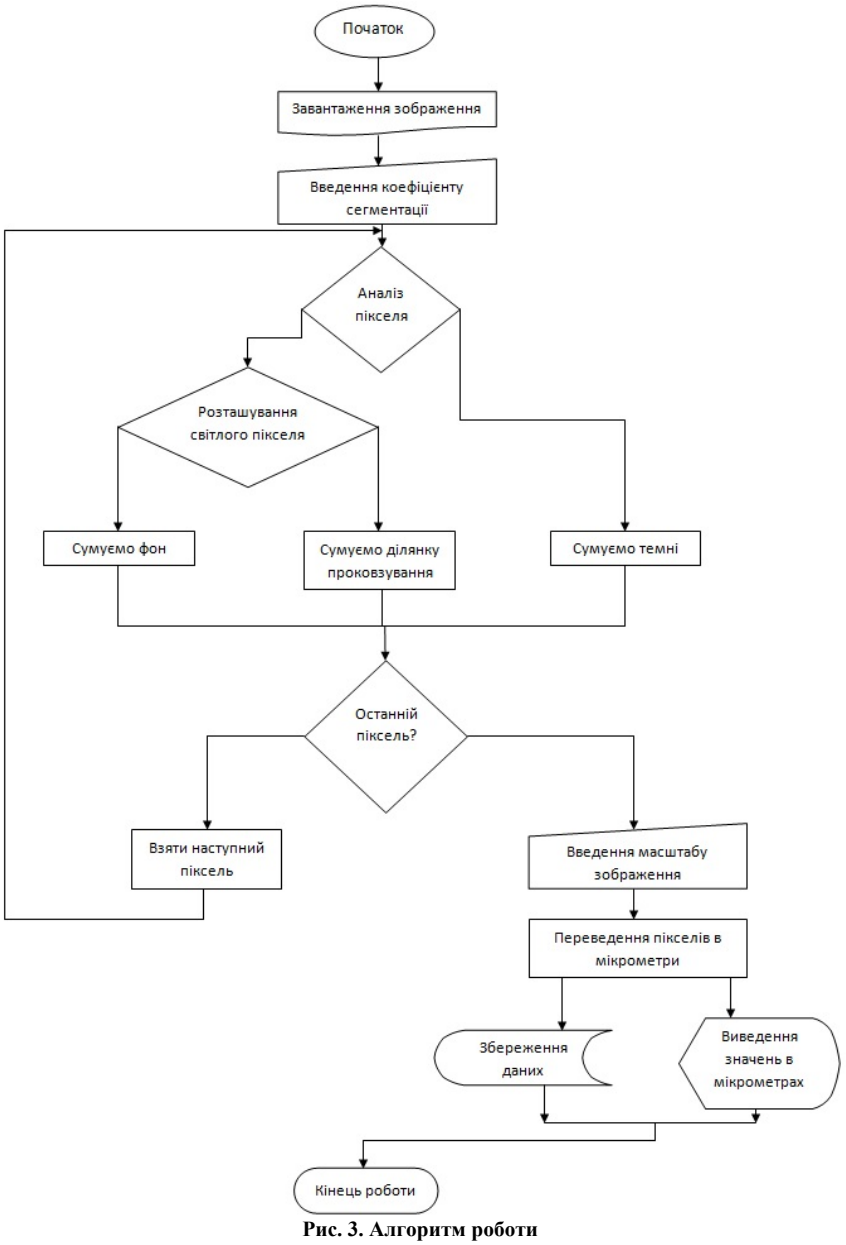


Рис. 3. Алгоритм роботи

використавши масштабування зображення, тобто визначає площу контакту (НКП), площу ділянки проковзування (ККП) та ділянку зчеплення.

Алгоритм роботи програми показаний на рисунку 3.

Провівши аналіз зображення програма дозволяє перевести значення пікселів в мікрометри. Для цього необхідно задати масштаб зображення (кількість пікселів в відповідній кількості мікрометрів), Після обрахунків з'являються значення зон контакту в мікрометрах квадратних (мкм^2). Також програма дозволяє зберегти отримані значення в файл з розширенням .txt.

На рисунку 4 показаний інтерфейс програми.

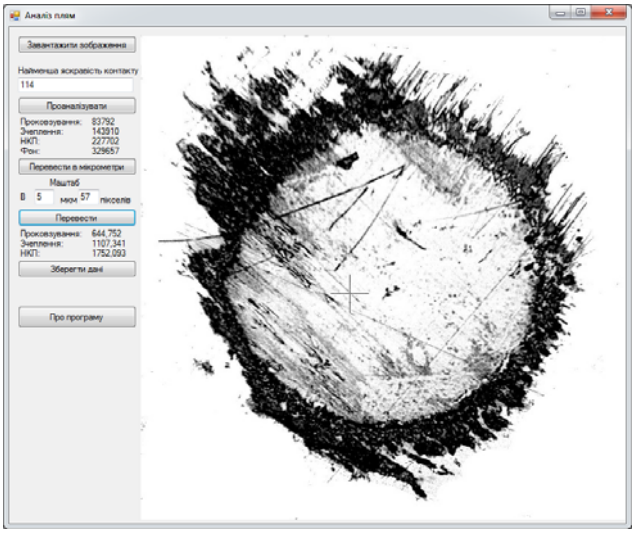


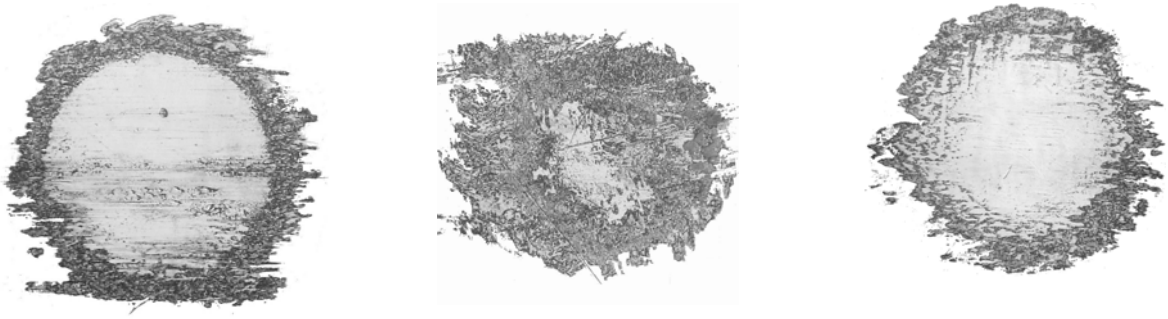
Рис. 4. Інтерфейс програми

Проаналізувавши наступні плями контакту, рисунок 5, були отримані результати:

1) для першого зображення площа проковзування склала 1728,550 мм^2, площа ділянки зчеплення 4889,576 мм^2, номінальна контактна площа 6618,126 мм^2;

2) для другого зображення площа проковзування склала 4699,702 мм^2, площа ділянки зчеплення 3986,124 мм^2, номінальна контактна площа 8685,826 мм^2;

3) для третього зображення площа проковзування склала 2189,432 мм^2, площа ділянки зчеплення 4593,859 мм^2, номінальна контактна площа 6783,292 мм^2.



5.1 **5.2** **5.3**

Рис. 5. Плями контакту, що були проаналізовані

Таким чином отримують точне значення площі контакту будь-якої форми, що не потребує використання додаткових засобів та пристроїв. Проведені досліди доводять, що програмний продукт здатен аналізувати і проводити підрахунки площ ділянок проковзування, зчеплення та площі номінального контакту складних форм та різних за розміром.

Висновки

Програмний продукт реалізовує аналіз плям контакту будь якої конфігурації та дозволяє отримувати числові характеристики площі контакту без застосування додаткових вимірювальних пристроїв або спеціалізованого обладнання. Це дає можливість аналізувати руйнування поверхонь незалежно від роботи вузла та способу навантаження.

Література

1. Ткачук М. М. Аналіз контактної взаємодії складнопрофільних елементів машинобудівних

конструкцій з кінематично спряженими поверхнями / М. М. Ткачук // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип.: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ "ХПІ", 2011. – № 22. – С. 123–140.

2. Большая Энциклопедия Нефти Газа. Фактическая площадь – контакт [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ngpedia.ru/id264327p1.html.

3. Дёмкин Н.Б. Приближённый расчёт характеристик контакта деталей машин : дис. … к.т.н. : 01.02.06 / Дёмкин Н.Б. – К., 1974. – С. 3–11.

4. Грязев В.М. Выбор метода определения фактической площади контакта поверхностей взаимодействующих деталей / В.М. Грязев // Известия. ТулГу. Технические науки. 2013. – Вып. 10. – С. 26–27.

5. Методы исследования состояния поверхностного слоя [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://lib.chdu.edu.ua/pdf/monograf/4/4.pdf.

6. Физика и механика полимеров. Основные положения теории трения твердых тел [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://proizvodim.com/osnovnye-polozheniya-teorii-treniya-tverdyx-tel.html.

7. Шалапко Ю. І. Процеси фретинг-зношування та фретинг-втоми в номінально-нерухомих з'єднаннях деталей машин / Ю. І. Шалапко // Трибофатика : пр. симп., 23–27 верес. 2002 р., Тернопіль. – Т., 2002. – Т. 1. – С. 279–283.

8. Дацюк Ю.Р. Система мікрофотографування з використанням цифрової камери [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.lnu.edu.ua/faculty/geology/phis_geo/Datsyuk/sci.html.

9. Тіт В.А. Фретинг-корозія як один з основних видів зношування в гідромашинах, та її наслідки / В. А. Тіт // Проблеми тертя та зношування. – 2011. – № 56. – С. 142–146.

Рецензія/Peer review : 11.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ковтун В.В.

УДК 534.1(075.8)

Ю.С. КРУТІЙ
Одеська державна академія будівництва та архітектури

ТОЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ВИМУШЕНИХ ПОЗДОВЖНІХ КОЛИВАНЬ СТЕРЖНЯ З ДОВІЛЬНИМИ НЕПЕРЕРВНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Розглядаються вимушені поздовжні коливання стержня з довільною неперервною поздовжньою жорсткістю і довільною неперервною інтенсивністю розподіленої маси при гармонічному навантаженні, з урахуванням сил опору. Знайдено точний розв'язок відповідного диференціального рівняння коливань в частинних похідних. Як наслідок, в аналітичному вигляді отримано формули для динамічного переміщення та динамічної поздовжньої сили в довільному перерізі стержня.

Ключові слова: стрижень, безперервні параметри, поздовжні коливання, безперервна маса, безперервна жорсткість, точне рішення.

Y. S. KRUTII
Odessa State Academy of construction and architecture

THE EXACT SOLUTION OF THE DIFFERENTIAL EQUATION OF FORCED LONGITUDINAL VIBRATIONS OF A ROD WITH ARBITRARY CONTINUOUS PARAMETERS

We consider forced longitudinal vibrations of a core with any continuous longitudinal rigidity and any continuous intensity of distributed mass with a harmonic load, taking into account the forces of resistance. The exact solution of the corresponding differential equation of the vibrations in partial derivatives was found. As a result, an analytical look of formulas for the dynamic displacement and dynamic longitudinal force in any section of the core were derived.

Keywords: rod, continuous parameters, longitudinal oscillations, continuous mass, continuous rigidity, the exact solution.

Вступ. Серед коливальних систем особливої уваги заслуговують стержні зі змінними параметрами. Такі стержні часто застосовуються в літакобудуванні, суднобудуванні, містобудуванні, при будівництві телевізійних веж, димових труб, опор ліній електропередач і т.п. Тому дослідження коливань таких об’єктів є важливою науковою та практичною проблемою.

Однак в процесі досліджень часто виникають проблеми, зумовлені складністю побудови точних розв’язків відповідних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. З одного боку, зрозуміло, що саме точні розв'язки таких рівнянь несуть в собі інформацію якісного характеру і формують найбільш повну картину даного явища. З іншого боку, точні розв’язки в теорії коливань являють собою рідкісний виняток.

Отже тут ми стикаємось із відомою математичною проблемою – відсутністю універсального методу прямого інтегрування звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Але відсутність методу не означає, що такі рівняння взагалі не мають аналітичного розв'язку, як це стверджується в роботі [4]. Прикладом наявності аналітичного розв’язку може слугувати публікація [3]. В якості ще одного прикладу виступає дана робота.

Стаття присвячена невирішеній до цього часу проблемі – побудові точного розв'язку диференціального рівняння вимушених поздовжніх коливань стержня з довільними неперервно-розподіленими параметрами та з урахуванням сил опору, що є актуальною науковою та практичною проблемою. Також актуальність роботи полягає в тому, що на прикладі вказаного рівняння розкривається суть нового методу прямого інтегрування звичайних диференціальних рівнянь зі змінними неперервними коефіцієнтами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі коливання стержнів присвячено велику кількість робіт, що зумовлено її актуальністю та практичною значимістю. Серед сучасних публікацій варто відзначити роботи [1, 5, 7–17]. При цьому значна увага приділяється коливанням стержнів зі змінними неперервними параметрами [1, 5, 12, 14, 15]. Всупереч тому, що точні розв'язки мають безсумнівну перевагу, вони зустрічаються всього для декількох видів стержнів. Фактично мова йде про випадки, коли коефіцієнти відповідних диференціальних рівнянь змінюються за біноміальними законами [1, стор. 344, 361; 8, стор. 627; 12, стор. 86]. Тоді сам розв'язок виражається через функції Бесселя. Для загального випадку констатується, що аналітичні розв'язки невідомі [1, стор. 344], або відзначається, що знайти їх не представляється можливим [15, стор. 265]. Тому переважно дослідження ґрунтуються на різного роду наближених методах.

Отже аналіз сучасних публікацій свідчить про актуальність розробки універсального методу інтегрування диференційних рівнянь зі змінними неперервними коефіцієнтами та побудови точних розв'язків для конкретних рівнянь коливань.

Постановка завдання. Будемо розглядати вимушені поздовжні коливання стержня. Відповідна розрахункова схема зображена на рис. 1.

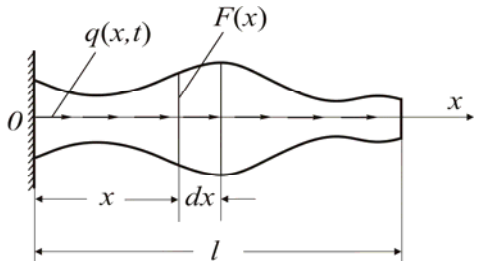


Рис. 1. Розрахункова схема стержня при поздовжніх коливаннях

Відомо [1, 14], що диференціальне рівняння вимушених поздовжніх коливань стержня з урахуванням сил опору в загальному випадку записується так

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(E(x)F(x)\frac{\partial u}{\partial x}\right)+m(x)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+p(x,t)-r(x,t)=q(x,t)\,, \tag{1}$$

де $E(x)F(x)-$ поздовжня жорсткість в точці x;

$E(x)-$ модуль пружності матеріалу стержня;

$F(x)-$ площа поперечного перерізу стержня;

$m(x)=\rho(x)F(x)-$ інтенсивність розподіленої маси в точці x;

$\rho(x)-$ щільність матеріалу стержня;

$p(x,t)-$ інтенсивність сил зовнішнього опору;

$r(x,t)-$ інтенсивність сил внутрішнього опору;

$q(x,t)-$ інтенсивність повздовжнього динамічного навантаження;

$u(x,t)-$ невідома функція – поздовжнє переміщення перерізу з координатою x в момент часу t.

Надалі вважаємо, що діюче на стержень динамічне навантаження є гармонічним, тобто $q(x,t)=q(x)\sin\theta t$, де $q(x)-$ довільна неперервна амплітудна функція; $\theta-$ частота змушувальної сили.

Для зовнішнього тертя приймаємо гіпотезу, за якою сила опору пропорційна масі стержня і швидкості [1, стор. 269], а внутрішнє тертя будемо враховувати за гіпотезою Кельвіна – Фойхта [1, стор. 270], згідно якій сила внутрішнього опору пропорційна швидкості деформації. В такому випадку рівняння (1) приймає вигляд

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(E(x)F(x)\frac{\partial u}{\partial x}\right)+m(x)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+\alpha m(x)\frac{\partial u}{\partial t}-\beta\frac{\partial^2}{\partial t\partial x}\left(E(x)F(x)\frac{\partial u}{\partial x}\right)=q(x)\sin\theta t\,. \tag{2}$$

де $\alpha,\beta-$ сталі коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього тертя відповідно.

Ставиться завдання:

- знайти точний розв'язок диференціального рівняння (2) з довільними неперервно-розподіленими параметрами $E(x)F(x),\ m(x),\ q(x)$;
- отримати точні формули для динамічного переміщення та динамічної поздовжньої сили;
- розкрити суть методу прямого інтегрування звичайних диференціальних рівнянь з неперервними коефіцієнтами.

Результати. Розв'язок рівняння (2) будемо шукати з узагальненим розподілом змінних

$$u(x,t)=u_1(x)\sin\theta t+u_2(x)\cos\theta t\,, \tag{3}$$

де $u_1(x),u_2(x)-$ невідомі функції, залежні тільки від змінної x. Тоді для динамічної поздовжньої сили за відомою формулою [1]

$$N(x,t) = E(x)F(x)\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \beta\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x}\right)$$

будемо мати

$$N(x,t) = N_1(x)(\sin\theta t + \beta\theta\cos\theta t) + N_2(x)(\cos\theta t - \beta\theta\sin\theta t)\,, \tag{4}$$

де

$$N_j(x) = E(x)F(x)u_j'(x)\ (j=1,2)\,. \tag{5}$$

Як видно, динамічні параметри стержня $u(x,t)$, $N(x,t)$ повністю будуть визначатися функціями $u_j(x), N_j(x)\ (j=1,2)$, які назвемо *складовими* для своїх динамічних параметрів.

Здійснивши в рівнянні (2) підстановку (3) та зібравши там подібні при тригонометричних функціях, маємо

$$\left[(E(x)F(x)u_1'(x))' + \theta^2 m(x)u_1(x) + \alpha\theta m(x)u_2(x) - \beta\theta(E(x)F(x)u_2'(x))' + q(x)\right]\sin\theta t +$$

$$+\left[(E(x)F(x)u_2'(x))' + \theta^2 m(x)u_2(x) - \alpha\theta m(x)u_1(x) + \beta\theta(E(x)F(x)u_1'(x))'\right]\cos\theta t = 0.$$

Отримане рівняння повинно задовольнятись для любого значення t, що можливо тільки у випадку рівності нулю множників при функціях $\sin\theta t$ і $\cos\theta t$. В підсумку приходимо до системи диференціальних рівнянь

$$-\begin{pmatrix} 1 & -\beta\theta \\ \beta\theta & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} (E(x)F(x)u_1'(x))' \\ (E(x)F(x)u_2'(x))' \end{pmatrix} = \theta m(x)\begin{pmatrix} \theta & \alpha \\ -\alpha & \theta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} u_1(x) \\ u_2(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q(x) \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Матриці, що фігурують в запису системи, єдиним перетворенням подібності приводяться до діагонального виду:

$$S^{-1}\begin{pmatrix} 1 & -\beta\theta \\ \beta\theta & 1 \end{pmatrix}S = \begin{pmatrix} 1+i\beta\theta & 0 \\ 0 & 1-i\beta\theta \end{pmatrix};\quad S^{-1}\begin{pmatrix} \theta & \alpha \\ -\alpha & \theta \end{pmatrix}S = \begin{pmatrix} \theta-i\alpha & 0 \\ 0 & \theta+i\alpha \end{pmatrix},$$

де $S = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{pmatrix}$, $i-$ уявна одиниця. Внаслідок цього, після заміни

$$\begin{pmatrix} u_1(x) \\ u_2(x) \end{pmatrix} = S\begin{pmatrix} z(x) \\ \overline{z(x)} \end{pmatrix}$$

система (6) зводиться до двох самостійних рівнянь

$$(1+i\beta\theta)(E(x)F(x)z'(x))' + \theta(\theta - i\alpha)m(x)z(x) = -\frac{q(x)}{2}\,, \tag{7}$$

$$(1-i\beta\theta)\left(E(x)F(x)\overline{z(x)}'\right)' + \theta(\theta+i\alpha)m(x)\overline{z(x)} = -\frac{q(x)}{2} \tag{8}$$

відносно нових невідомих функцій

$$z(x) = \frac{u_1(x) + iu_2(x)}{2},\ \ \overline{z(x)} = \frac{u_1(x) - iu_2(x)}{2}\,. \tag{9}$$

Важливо зазначити, що будь-яке з двох рівнянь (7), (8) можна отримати комплексним спряженням іншого. Отже, якщо $z(x)-$ розв'язок першого рівняння, то розв'язком другого буде $\overline{z(x)}$, і навпаки. Тому в подальшому є сенс розглядати тільки одне з цих рівнянь.

Виберемо для подальшого розгляду рівняння (7), яке перепишемо так

$$(E(x)F(x)z'(x))' + \lambda^2 m(x)z(x) = -\frac{q(x)}{2(1+i\beta\theta)}\,, \tag{10}$$

де $\lambda^2 = \theta^2\dfrac{1 - i\,\alpha/\theta}{1+i\beta\theta}$. Запишемо також систему диференціальних рівнянь, рівносильну даному рівнянню

$$\frac{dZ(x)}{dx} = P(x)Z(x) - f(x)\,. \tag{11}$$

В цій системі вектор невідомих, матриця коефіцієнтів та вектор правої частини мають вигляд:

$$Z(x) = \begin{pmatrix} z(x) \\ E(x)F(x)z'(x) \end{pmatrix};\ \ P(x) = \begin{pmatrix} 0 & \dfrac{1}{E(x)F(x)} \\ -\lambda^2 m(x) & 0 \end{pmatrix};\ \ f(x) = \frac{q(x)}{2(1+i\beta\theta)}\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Для побудови точного розв'язку рівняння (10) застосуємо метод прямого інтегрування, суть якого вперше було викладено в роботі [3]. Згідно з цим методом, розглянемо три нескінченних системи поки що невідомих функцій $a_{n,0}(x)$, $a_{n,k}(x)\ (n=1,2,3)\ (k=1,2,3,...)$, які вважаємо неперервними разом зі своїми першою та другою похідними. Дотримуючись термінології, що була прийнята в [3], функції $a_{n,0}(x)$ будемо

називати *початковими*, а $a_{n,k}(x)$ – *твірними*.

Створимо за допомогою введених функцій та їх похідних ряди по степеням параметра $-\lambda^2$:

$$U_n(x) = a_{n,0}(x) - \lambda^2 a_{n,1}(x) + \lambda^4 a_{n,2}(x) - \lambda^6 a_{n,3}(x) + \cdots; \tag{12}$$

$$U_n'(x) = a_{n,0}'(x) - \lambda^2 a_{n,1}'(x) + \lambda^4 a_{n,2}'(x) - \lambda^6 a_{n,3}'(x) + \cdots; \tag{13}$$

$$\begin{aligned}(E(x)F(x)U_n'(x))' &= (E(x)F(x)a_{n,0}'(x))' - \lambda^2 (E(x)F(x)a_{n,1}'(x))' + \\ &+ \lambda^4 (E(x)F(x)a_{n,2}'(x))' - \lambda^6 (E(x)F(x)a_{n,3}'(x))' + \cdots.\end{aligned} \tag{14}$$

Поки припускаємо, що всі ряди рівномірно збігаються на відрізку $x \in [0,l]$.

Функції перших двох систем $a_{n,0}(x)$, $a_{n,k}(x)$ $(n=1,2)$ $(k=1,2,3,...)$ знайдемо із умови, що $U_n(x)$ $(n=1,2)$ задовольняє однорідному рівнянню, яке відповідає (10), тобто

$$(E(x)F(x)U_n'(x))' + \lambda^2 m(x)U_n(x) = 0 \ (n=1,2). \tag{15}$$

Функції третьої системи $a_{3,0}(x)$, $a_{3,k}(x)$ $(k=1,2,3,...)$ будемо шукати із умови, що $U_*(x) = -\dfrac{1}{2(1+i\beta\theta)}U_3(x)$ задовольняє неоднорідному рівнянню (10), тобто

$$(E(x)F(x)U_3'(x))' + \lambda^2 m(x)U_3(x) = q(x). \tag{16}$$

Підставляючи в (15), (16) замість $U_n(x)$, $(E(x)F(x)U_n'(x))'$ $(n=1,2,3)$ відповідні їм ряди (12), (14), приходимо до наступних рівностей, що повинні задовольнятись для любого значення параметра $-\lambda^2$:

$$(E(x)F(x)a_{n,0}'(x))' + \sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k \lambda^{2k}\left[(E(x)F(x)a_{n,k}'(x))' - m(x)a_{n,k-1}(x)\right] = 0 \ (n=1,2);$$

$$(E(x)F(x)a_{3,0}'(x))' - q(x) + \sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k \lambda^{2k}\left[(E(x)F(x)a_{3,k}'(x))' - m(x)a_{3,k-1}(x)\right] = 0.$$

Прирівнюючи в цих рівностях до нуля всі коефіцієнти при степенях $-\lambda^2$, включаючи нульову степінь, будемо мати:

$$(E(x)F(x)a_{n,0}'(x))' = 0 \ (n=1,2); \tag{17}$$

$$(E(x)F(x)a_{3,0}'(x))' = q(x); \tag{18}$$

$$(E(x)F(x)a_{n,k}'(x))' = m(x)a_{n,k-1}(x) \ (n=1,2,3) \ (k=1,2,3,...). \tag{19}$$

Отже, для знаходження початкових та твірних функцій маємо диференціальні рівняння. Виписуючи фундаментальну систему функцій однорідного рівняння (17) та частинний розв'язок неоднорідного рівняння (18), визначаємо початкові функції

$$a_{1,0}(x) = 1, \ a_{2,0}(x) = \int_0^x \frac{1}{E(x)F(x)}dx, \ a_{3,0}(x) = \int_0^x \frac{1}{E(x)F(x)}\int_0^x q(x)dxdx. \tag{20}$$

Перед інтегруванням рівняння (19) задамо граничні умови

$$a_{n,k}(0) = E(0)F(0)a_{n,k}'(0) = 0 \quad (n=1,2,3) \ (k=1,2,3,...). \tag{21}$$

Тоді для твірних функцій знаходимо

$$a_{n,k}(x) = \int_0^x \frac{1}{E(x)F(x)}\int_0^x m(x)a_{n,k-1}(x)dxdx \ (n=1,2,3) \ (k=1,2,3,...). \tag{22}$$

Таким чином, знайдено рекурентну формулу, яка дозволяє кожній початковій функції $a_{n,0}(x)$ поставити у відповідність свою нескінченну систему твірних функцій $a_{n,k}(x)$. Для таких функцій рівності (15), (16) задовольняються за побудовою.

Формулу (22) можна також представити в розгорнутому вигляді

$$a_{n,k}(x) = \int_0^x \frac{1}{E(x)F(x)}\int_0^x m(x) \ ... \int_0^x \frac{1}{E(x)F(x)}\int_0^x m(x)a_{n,0}(x) \ dxdx \ ... \ dxdx. \tag{23}$$

Кількість інтегралів в даній формулі, без врахування інтегралів, через які визначені початкові функції, дорівнює $2k$.

Доведемо тепер, що ряд (12) рівномірно збігається. Вводячи позначення

$$g_1 = \max_{x\in[0,l]} m(x), \ \ g_2 = \max_{x\in[0,l]} \frac{1}{E(x)F(x)}, \ \ h_n = \max_{x\in[0,l]} \left|a_{n,0}(x)\right|,$$

за допомогою (23) отримаємо оцінки

$$\left|a_{n,k}(x)\right| \le h_n(g_1g_2)^k \left|\int_0^x\int_0^x ...\int_0^x\int_0^x dxdx...dxdx\right| = h_n(g_1g_2)^k \frac{x^{2k}}{(2k)!} \ (k=1,2,3,...).$$

Тоді для ряду із модулів будемо мати

$$\left|a_{n,0}(x)\right|+\left|\lambda^2 a_{n,1}(x)\right|+\left|\lambda^2 a_{n,1}(x)\right|+\cdots\le h_n\left(1+g_1g_2\,\lambda^2\frac{x^2}{2!}+(g_1g_2)^2\lambda^4\frac{x^4}{4!}+\cdots\right)=h_n\ \operatorname{ch}\sqrt{g_1g_2}\lambda x\ .$$

Отже, с точністю до множника h_n, в ролі мажоранти тут виступає елементарна функція $\operatorname{ch}\sqrt{g_1g_2}\lambda x$. Тим самим доведено, що ряд (12) збігається абсолютно і рівномірно на відрізку $x\in[0,l]$.

Абсолютна і рівномірна збіжність ряду (13) доводиться аналогічно. Збіжність ряду (14) взагалі не потребує доведення, оскільки він згідно з тотожностями (15), (16) відрізняється від ряду (12) тільки множником та скалярним доданком. Як наслідок, ряди (12), (13) можна почленно диференціювати, а це означає, що вибрані раніше позначення $U_n'(x)$ і $(E(x)F(x)\,U_n'(x))'$ для рядів (13) і (14) законні.

Кожному із розв'язків $U_n(x)\,(n=1,2)$ однорідного рівняння, що відповідає (10), поставимо у відповідність вектор

$$\Phi_n(x)=\begin{pmatrix}U_n(x)\\E(x)F(x)U_n'(x)\end{pmatrix}(n=1,2)\,. \tag{24}$$

Безпосередньою підстановкою легко впевнитись, що такі вектори будуть розв'язками однорідної системи диференціальних рівнянь, що відповідає системі (11). Тоді матриця, складена із цих векторів

$$\Lambda(x)=\begin{pmatrix}U_1(x) & U_2(x)\\E(x)F(x)U_1'(x) & E(x)F(x)U_2'(x)\end{pmatrix}, \tag{25}$$

також буде задовольняти вказаній системі.

Знайдемо значення матриці $\Lambda(x)$ в точці $x=0$. Для цього спочатку виведемо формулу для вектора $\Phi_n(0)\,(n=1,2)$. Вважаючи $x=0$ в формулах (12), (13) та враховуючи граничні умови (21), отримуємо

$$\Phi_n(0)=\begin{pmatrix}U_n(0)\\E(0)F(0)U_n'(0)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a_{n,0}(0)\\E(0)F(0)a_{n,0}'(0)\end{pmatrix}(n=1,2)\,.$$

Звідси, врахувавши (20), знаходимо $\Phi_1(0)=\begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$, $\Phi_2(0)=\begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$ і, як наслідок,

$$\Lambda(0)=\begin{pmatrix}1 & 0\\0 & 1\end{pmatrix}. \tag{26}$$

Зважаючи на нерівність $\left|\Lambda(0)\right|=1\neq 0$ заключаємо, що вектори (24) лінійно незалежні [6, стор. 186], тобто матриця (25) являє собою фундаментальну матрицю системи. Як відомо [2, стор. 405], фундаментальна матриця, яка задовольняє умові (26), знаходиться однозначно і називається матрицантом.

За допомогою частинного розв'язку $U_*(x)$ рівняння (10) створимо вектор

$$\Psi_*(x)=\begin{pmatrix}U_*(x)\\E(x)F(x)U_*'(x)\end{pmatrix}=-\frac{1}{2(1+i\beta\theta)}\begin{pmatrix}U_3(x)\\E(x)F(x)U_3'(x)\end{pmatrix},$$

який буде частинним розв'язком системи (11), в чому легко переконатись безпосередньою перевіркою. Для цього вектора, враховуючи (21), та приймаючи до уваги, що $a_{3,0}(0)=E(0)F(0)a_{3,0}'(0)=0$, знаходимо

$$\Psi_*(0)=-\frac{1}{2(1+i\beta\theta)}\begin{pmatrix}U_3(0)\\E(0)F(0)U_3'(0)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}.$$

Скориставшись тепер відомою формулою [6, стор. 185], легко виписати загальний розв'язок системи (11)

$$Z(x)=\Lambda(x)Z(0)+\Psi_*(x)\,. \tag{27}$$

З іншого боку, враховуючи (5), (9), для вектора $Z(x)$ можемо записати

$$Z(x)=\begin{pmatrix}z(x)\\E(x)F(x)z'(x)\end{pmatrix}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}u_1(x)+iu_2(x)\\N_1(x)+iN_2(x)\end{pmatrix}. \tag{28}$$

Переписуючи тепер матричну рівність (27) в розгорнутому вигляді та враховуючи при цьому (28), приходимо до формул:

$$u_1(x)+iu_2(x)=(u_1(0)+iu_2(0))U_1(x)+(N_1(0)+iN_2(0))U_2(x)-\frac{U_3(x)}{1+i\beta\theta}\,; \tag{29}$$

$$N_1(x)+iN_2(x)=E(x)F(x)\left((u_1(0)+iu_2(0))U_1'(x)+(N_1(0)+iN_2(0))U_2'(x)-\frac{U_3'(x)}{1+i\beta\theta}\right). \tag{30}$$

Таким чином, знайдено комплексні функції, дійсною частиною яких є складові $u_1(x), N_1(x)$, а в ролі уявної частини виступають складові $u_2(x), N_2(x)$. Відповідно з цим будемо розрізняти *дійсні* та *уявні складові* динамічних параметрів.

Виходячи з рівності $U_n(x)=\mathrm{Re}\,U_n(x)+i\,\mathrm{Im}\,U_n(x)$ $(n=1,2,3)$, відокремимо в правих частинах формул (29), (30) дійсну і уявну частину. В підсумку, для дійсних складових динамічних параметрів отримаємо:

$$u_1(x)=u_1(0)\,\mathrm{Re}\,U_1(x)+N_1(0)\,\mathrm{Re}\,U_2(x)-$$
$$-u_2(0)\,\mathrm{Im}\,U_1(x)-N_2(0)\,\mathrm{Im}\,U_2(x)-\frac{\mathrm{Re}\,U_3(x)+\beta\theta\,\mathrm{Im}\,U_3(x)}{1+\beta^2\theta^2}; \tag{31}$$

$$N_1(x)=E(x)F(x)\left(\begin{array}{l}u_1(0)\,\mathrm{Re}\,U_1'(x)+N_1(0)\,\mathrm{Re}\,U_2'(x)-\\-u_2(0)\,\mathrm{Im}\,U_1'(x)-N_2(0)\,\mathrm{Im}\,U_2'(x)-\dfrac{\mathrm{Re}\,U_3'(x)+\beta\theta\,\mathrm{Im}\,U_3'(x)}{1+\beta^2\theta^2}\end{array}\right). \tag{32}$$

Для уявних складових динамічних параметрів будемо мати

$$u_2(x)=u_2(0)\,\mathrm{Re}\,U_1(x)+N_2(0)\,\mathrm{Re}\,U_2(x)+$$
$$+u_1(0)\,\mathrm{Im}\,U_1(x)+N_1(0)\,\mathrm{Im}\,U_2(x)-\frac{\mathrm{Im}\,U_3(x)-\beta\theta\,\mathrm{Re}\,U_3(x)}{1+\beta^2\theta^2}; \tag{33}$$

$$N_2(x)=E(x)F(x)\left(\begin{array}{l}u_2(0)\,\mathrm{Re}\,U_1'(x)+N_2(0)\,\mathrm{Re}\,U_2'(x)+\\+u_1(0)\,\mathrm{Im}\,U_1'(x)+N_1(0)\,\mathrm{Im}\,U_2'(x)-\dfrac{\mathrm{Im}\,U_3'(x)-\beta\theta\,\mathrm{Re}\,U_3'(x)}{1+\beta^2\theta^2}\end{array}\right). \tag{34}$$

Для повної визначеності осталось відокремити в явному вигляді дійсні і уявні частини для функцій $U_n(x)$ $(n=1,2,3)$. Для цього представимо число λ^2 в тригонометричній формі. Виходячи з тригонометричної форми запису чисел $1-i\,\alpha/\theta$ та $1+i\beta\theta$, для числа λ^2 будемо мати

$$\lambda^2=\theta^2\frac{1-i\,\alpha/\theta}{1+i\beta\theta}=\theta^2\sqrt{\frac{1+(\alpha/\theta)^2}{1+\beta^2\theta^2}}(\cos\gamma-i\sin\gamma),$$

де $\gamma=\mathrm{arctg}\,\alpha/\theta+\mathrm{arctg}\,\beta\theta$. Тоді за формулою Муавра

$$\lambda^{2k}=\theta^{2k}\left(\frac{1+(\alpha/\theta)^2}{1+\beta^2\theta^2}\right)^{\frac{k}{2}}(\cos k\gamma-i\sin k\gamma). \tag{35}$$

В результаті, виходячи з (12), (35), приходимо до необхідної форми запису

$$U_n(x)=a_{n,0}(x)+\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k\lambda^{2k}a_{n,k}(x)=$$
$$=a_{n,0}(x)+\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k\Theta^{2k}\cos k\gamma\,a_{n,k}(x)-i\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^k\Theta^{2k}\sin k\gamma\,a_{n,k}(x)\ (n=1,2,3), \tag{36}$$

де $\Theta=\theta\sqrt[4]{\dfrac{1+(\alpha/\theta)^2}{1+\beta^2\theta^2}}$.

Таким чином, формулами (3), (4), (31)– (34), (36) повністю визначені динамічні параметри стержня. Зокрема, знайдено точний розв'язок рівняння (2). Довільні константи в формулах (31) – (34) представлені у вигляді начальних значень дійсних та уявних складових динамічних параметрів (*початкові параметри*). Вказані константи при розв’язанні конкретних задач знаходяться із граничних умов на кінцях стержня.

Наприкінці вкажемо на рівносильну форму запису формул (3), (4):

$$u(x,t)=u(x)\sin\big(\theta t+\delta_u(x)\big),\ u(x)=\sqrt{u_1^2(x)+u_2^2(x)},\ \delta_u(x)=\mathrm{arctg}\frac{u_2(x)}{u_1(x)};$$
$$N(x,t)=N(x)\sin\big(\theta t+\delta_N(x)\big),$$
$$N(x)=\sqrt{(N_1(x)-\beta\theta N_2(x))^2+(N_2(x)+\beta\theta N_1(x))^2},$$
$$\delta_N(x)=\mathrm{arctg}\frac{N_2(x)+\beta\theta N_1(x)}{N_1(x)-\beta\theta N_2(x)}.$$

Під час дослідження коливань такі формули зручніші, оскільки в них явно виділені амплітудні функції своїх динамічних параметрів.

Висновки. В роботі знайдено точний розв'язок диференціального рівняння вимушених поздовжніх гармонічних коливань стержня з довільними неперервними параметрами та з урахуванням сил опору. В аналітичному вигляді отримано формули для динамічних коливань та динамічних внутрішніх зусиль, що відкриває перспективу створення нового методу дослідження поздовжніх коливань стержня. Для цього достатньо вказати ефективний метод чисельної реалізації знайдених точних формул, чому планується присвятити наступну статтю.

Подальші перспективи також пов’язані із можливим застосуванням нового методу прямого інтегрування до інших диференціальних рівнянь механіки зі змінними неперервними коефіцієнтами.

Литература

1. Василенко М.В. Теорія коливань і стійкості руху / М.В. Василенко, О.М. Алексейчук. – К. : Вища шк., 2004. – 525 с.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц / Гантмахер Ф.Р. – М. : Наука, 1988. – 552 с.
3. Крутий Ю.С. Точное решение дифференциального уравнения свободных поперечных колебаний неоднородного прямого стержня переменного сечения с непрерывно распределенной переменной массой / Ю.С. Крутий // Строит. мех. и расчет сооруж. – 2011. – № 5. – С. 47–53.
4. Погребицкая А.М. К вопросу эффективности метода ВКБ–Галеркина в дифференциальных уравнениях с переменными коэффициентами / А.М. Погребицкая // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2008. – 51, № 1. – С. 82–87.
5. Трубачев С.И. Колебания стержней переменного сечения / С.И. Трубачев, О.Н. Алексейчук // Механіка гіроскоп. систем. – 2010. – Вип. 21 – С. 123–127.
6. Федорюк М.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Федорюк М.В. – М. : Наука, 1985. – 448 с.
7. Baddour N. (Ed.) Recent Advances in Vibrations Analysis. In Tech, 2011. 236 p.
8. Balakumar Balachandran, Magrab E.B. Vibrations. 2th Edition. Cengage Learning, 2008. 736 p.
9. Buchacz A., Żółkiewski S. Longitudinal vibrations of mechanical systems with the transportation effect. J. Achievements Mater. Manufact. Eng. 2009. 32, No. 1. p. 29–36.
10. Ebrahimi F. (Ed.) Advances in Vibration Analysis Research. In Tech, 2011. 456 p.
11. Lai H.-L., Hsu J.-C., Chen C.-K. An innovative eigenvalue problem solver for free vibration of Euler-Bernoulli beam by using the Adomian Decomposition Method. Comput. Math. Appl. 2008. 56, No.12. p. 3204–3220.
12. Leissa A.W., Qatu M.S. Vibrations of continuous systems. McGraw-Hill, 2011. 507 p.
13. Mao Q., Pietrzko S. Free vibration analysis of stepped beams by using Adomian decomposition Method. Appl. Math. Comput. 2010. 217, No.7. p. 3429–3441.
14. Rao S.S. Mechanical Vibrations. 5th Edition. Pearson Education, 2010. 1104 p.
15. Sinha A. Vibration of Mechanical Systems. Cambridge University Press, 2010. 324 p.
16. Wang C.Y., Wang C.M. Structural Vibration: Exact Solutions for Strings, Membranes, Beams, and Plates. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 290 p.
17. Yavari A., Sarkani S., Reddy J.N. On nonuniform Euler - Bernoulli and Timoshenko beams with jump discontinuities: application of distribution theory. Int. J. Solids Struct. 2001. 38, No. 46. p. 8389–8406.

Рецензія/Peer review : 17.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.

УДК 621.7: 519.85

О.В. ПЕТРОВ, С.І. СУХОРУКОВ, М.В. ТРОФИМЧУК, В.А. ПОДОЛЯК
Вінницький національний технічний університет

ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ЗАТИСКНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

В роботі представлені комп'ютерні програми, які дозволяють розраховувати величину сили закріплення та вихідне зусилля у затискних пристроях гвинтового, ексцентрикового та комбінованого типів, що використовуються під час проектування верстатних пристосувань. Розглянуті програми мають зручний інтерфейс, містять великий набір схем різання та закріплення заготовок, а також довідникові дані, що підвищує ефективність опрацювання вхідних даних та отримання значень конструктивних параметрів верстатних пристосувань.

Ключові слова: механічна обробка, заготовка, затискний пристрій, комп'ютерна програма.

O.V. PETROV, S.I. SUKHORUKOV, M.V. TROFYMCHUK, V.A. PODOLYAK
Vinnytsia National Technical University, Ukraine

AUTOMATION TOOLS FOR CALCULATING PARAMETERS OF CLAMPING DEVICES FOR MACHINING PROCESSES

Abstract – The paper presents software that enables computation of the holding force value and output force in clamping devices of screw, eccentric and combined types, which are used for designing machine-tool accessories. The presented software has user-friendly interface, a wide range of cutting and workpiece holding schemes as well as reference data, which increases the efficiency of initial data processing and obtaining the values of design parameters of machine-tool accessories.

Keywords: machining process, workpiece, clamping device, software.

Вступ

Під час виконання будь-якої технологічної операції використовується різноманітне оснащення, наприклад: пристосування, допоміжні інструменти, транспортне і завантажувальне оснащення та ін. Без застосування технологічного оснащення у виробництві обійтися практично неможливо. Причому це

стосується як одиничного, так і серійного виробництва. Найбільш широкого використання набув такий різновид оснащення, як верстатні пристосування [1, 2].

Проектування верстатного пристосування характеризується великим обсягом роботи, особливо це стосується проектно-конструкторських розрахунків. Роботи з проектування оснащення, як правило, охоплюють аналіз його службового призначення і наявних вимог до технологічних операцій, розробку принципової схеми (компонування) пристосування, силові розрахунки і розрахунки на точність, вибір силового приводу і визначення його параметрів. Чи не найбільше часу проектувальної роботи припадає на креслення розробленого верстатного пристосування чи на модернізацію існуючої конструкції. Час на таку роботу можна значно зменшити за рахунок використання сучасних комп'ютерних технологій, які допомагають не тільки виконувати комп'ютерне креслення і тривимірне моделювання об'єктів проектування, а також дозволяють виконувати різноманітні розрахунки силових та конструктивних параметрів, міцності деталей та інші [3].

Постановка задачі

У великосерійному та масовому виробництві використовується спеціальне технологічне оснащення, наприклад верстатні затискні пристрої, які проектуються та виготовляються на основі технологічних умов обробки конкретної деталі. Процес проектування верстатних затискних пристроїв, особливо вибір та розрахунок їх параметрів, є достатньо тривалий, оскільки супроводжується численними розрахунками, більшість з яких носять перевірочний характер. Виконання таких розрахунків навіть за допомогою обчислювальної техніки займає багато часу, оскільки при цьому слід використовувати довідникову літературу. Тому автоматизація виконання розрахунків та вибору параметрів верстатних затискних пристроїв для типових операцій механічної обробки є актуальною задачею.

Викладення основного матеріалу

На кафедрі ТАМ (ВНТУ) розроблено програми розрахунку сили закріплення деталі при обробці її свердлінням та фрезеруванням, а також параметрів затискних пристроїв на основі гвинтових, ексцентрикових та комбінованих механізмів.

На рис. 1 представлено програму для розрахунку сили закріплення деталі $Q_З$, що обробляється свердлінням. У програмі розглядаються три відомі типові схеми різання, використовуються довідникові дані для вибору коефіцієнтів тертя поверхонь контакту, а також для вибору складових та розрахунку загального коефіцієнта запасу [4].

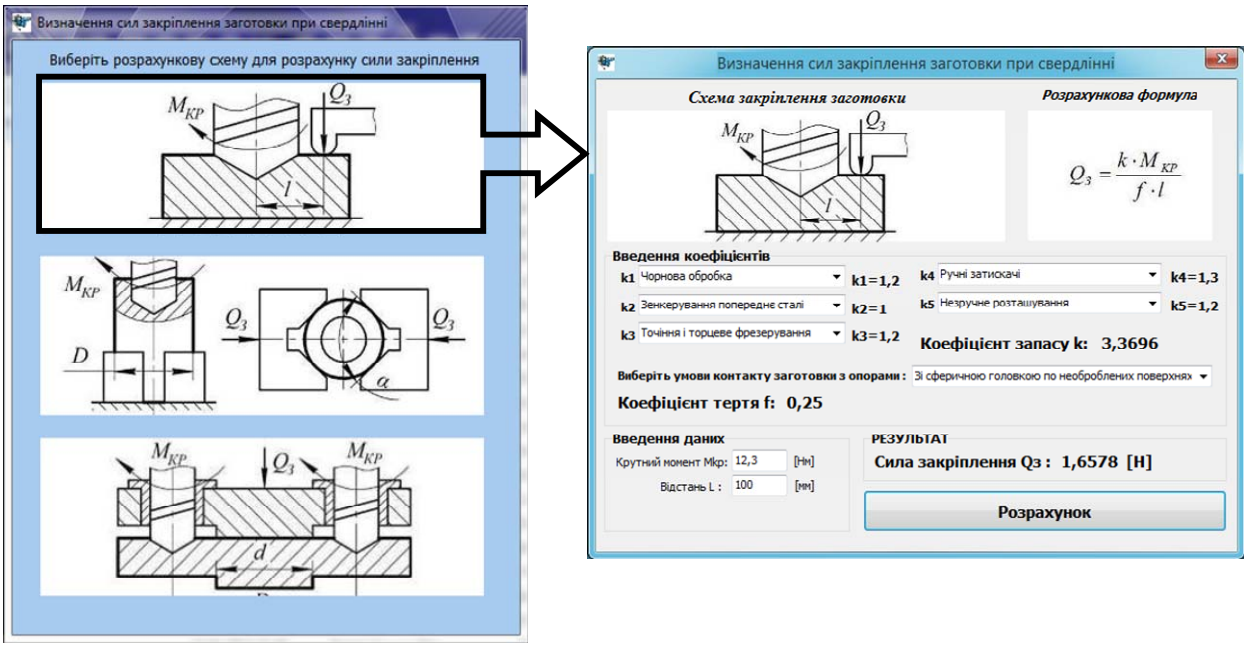


Рис. 1. Інтерфейс програми для розрахунку сил закріплення при свердлінні

У програмі наведено три варіанти розрахунку сили закріплення, що залежать від умов закріплення заготовки та виду свердлильної операції. Схема різання №1 відповідає умовам, при яких деталь закріплюється затискачем, що знаходиться на деякій відстані від місця обробки інструментом. Схема різання №2 відповідає умовам, при яких деталь закріплюється у двох призмах – рухомій та нерухомій. Схема різання №3 відповідає умовам, при яких деталь обробляється одночасно двома та більше інструментами із застосуванням кондукторних втулок. Після вибору потрібної схеми різання з'являється вікно, в якому виконується розрахунок сили закріплення. Даний розрахунок включає вибір шести складових та обчислення значення коефіцієнта запасу, вибір умов контакту деталі (заготовки) з опорами, що

виражається у значенні коефіцієнту тертя, а також здійснюється введення значень крутного моменту під час свердління та величин відстаней, що характеризують вибрану схему різання. Безпосередньо величина сили закріплення Q_3 розраховується після введення всіх вхідних значень та натискання кнопки «Розрахунок».

На рис. 2 представлено програму для розрахунку сили закріплення деталі Q_3, що обробляється фрезеруванням. У програмі розглядаються шість відомих типових схем різання і як у попередній програмі виконується вибір коефіцієнтів тертя поверхонь контакту та розрахунок загального коефіцієнта запасу [5]. Слід зазначити, що під час розрахунку коефіцієнта запасу у представлених програмах автоматично виконується перевірка величини коефіцієнта, яка має становити не менше 2,5. У випадку отримання значення менше 2,5 програма повідомляє про це та у подальших розрахунках використовує значення коефіцієнта запасу 2,5.

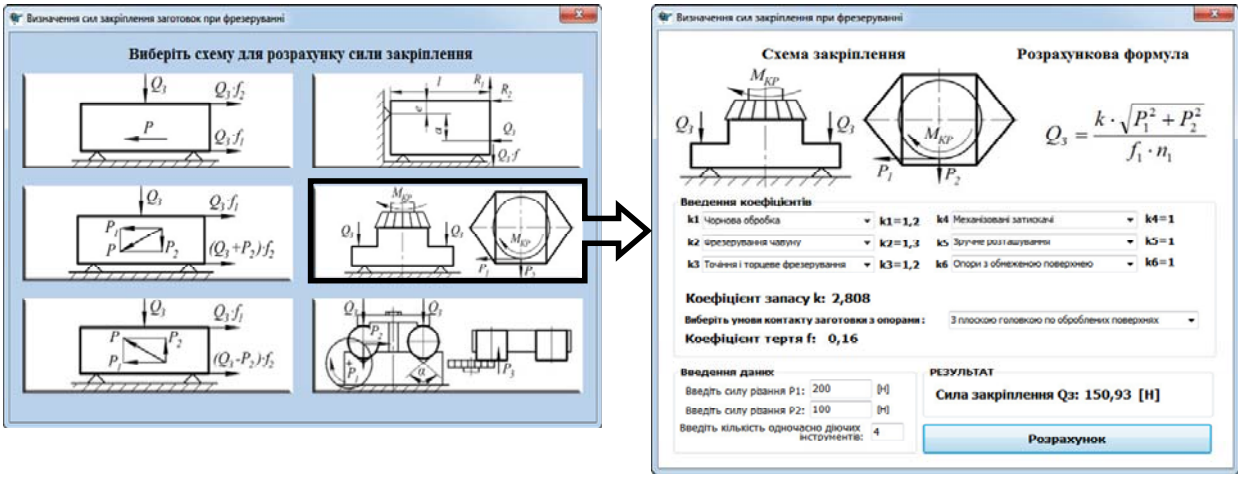


Рис. 2. Інтерфейс програми для розрахунку сил закріплення при фрезеруванні

У програмі наведено шість варіантів розрахунку сили закріплення, що залежать від умов закріплення заготовки та виду фрезерної операції. Схема різання №1 відповідає умовам, при яких заготовка обробляється повздовжнім фрезеруванням, а закріплюється заготовка затискачем зверху. Схема різання №2 відповідає умовам, при яких заготовка обробляється попутним фрезеруванням, а закріплюється заготовка затискачем зверху. Схема різання №3 відповідає умовам, при яких заготовка обробляється зустрічним фрезеруванням, а закріплюється заготовка затискачем зверху. Схема різання №4 відповідає умовам, при яких обробляється лиска заготовки, що закріплюється затискачем збоку. Схема різання №5 відповідає умовам, при яких обробляється площина заготовки, що закріплюється затискачами зверху. Схема різання №6 відповідає умовам, при яких обробляються торці циліндричних заготовок, що закріплюється затискачами зверху. Після вибору потрібної схеми різання з'являється вікно, в якому виконується розрахунок сили закріплення за алгоритмом, аналогічним до попередньої програми.

Після визначення сили закріплення необхідно обрати тип затискного пристрою, за допомогою якого буде реалізована схема закріплення. Основними критерієм вибору типу затискного пристрою є тип виробництва деталі. Для одиничного та дрібносерійного виробництва доцільно використовувати гвинтові затискні пристрої, для дрібносерійного та середньосерійного виробництва – ексцентрикові затискні пристрої, для середньосерійного та багатосерійного, а іноді і масового виробництва – комбіновані затискні пристрої на основі пневматичних приводів. На рисунка 3–5 представлені програми для розрахунку параметрів таких затискних пристроїв, а також вихідного зусилля, необхідного для приведення у дію затискачів пристроїв.

На рис. 3 представлена програма, що призначена для розрахунку параметрів гвинтових затискних пристроїв та вихідного зусилля P_B на гвинті [6]. Програма містить п'ять відомих типових схем гвинтових затискачів. Для проведення розрахунків необхідно спочатку вибрати необхідну схему після чого з'являється відповідний перелік вхідних даних. Перелік вхідних даних включає: величину сили закріплення Q_3, діаметр гвинта, довжини кінематичних ланок, кути між ланками, коефіцієнт корисної дії затискача та інші. Після введення даних результати розрахунку величини вихідної сили P_B, що необхідно прикласти до гвинта, з'являється автоматично у вікні «Результат розрахунку».

На рис. 4 представлена програма, що призначена для розрахунку параметрів ексцентрикових затискних пристроїв та вихідного зусилля P_B на важелі ексцентрика [7]. Програма містить чотири відомі типові схеми ексцентрикових затискачів. Як і у попередній програмі після вибору необхідної схеми та введення вхідних даних результати розрахунку величини вихідної сили з'являється автоматично у вікні «Результат розрахунку».

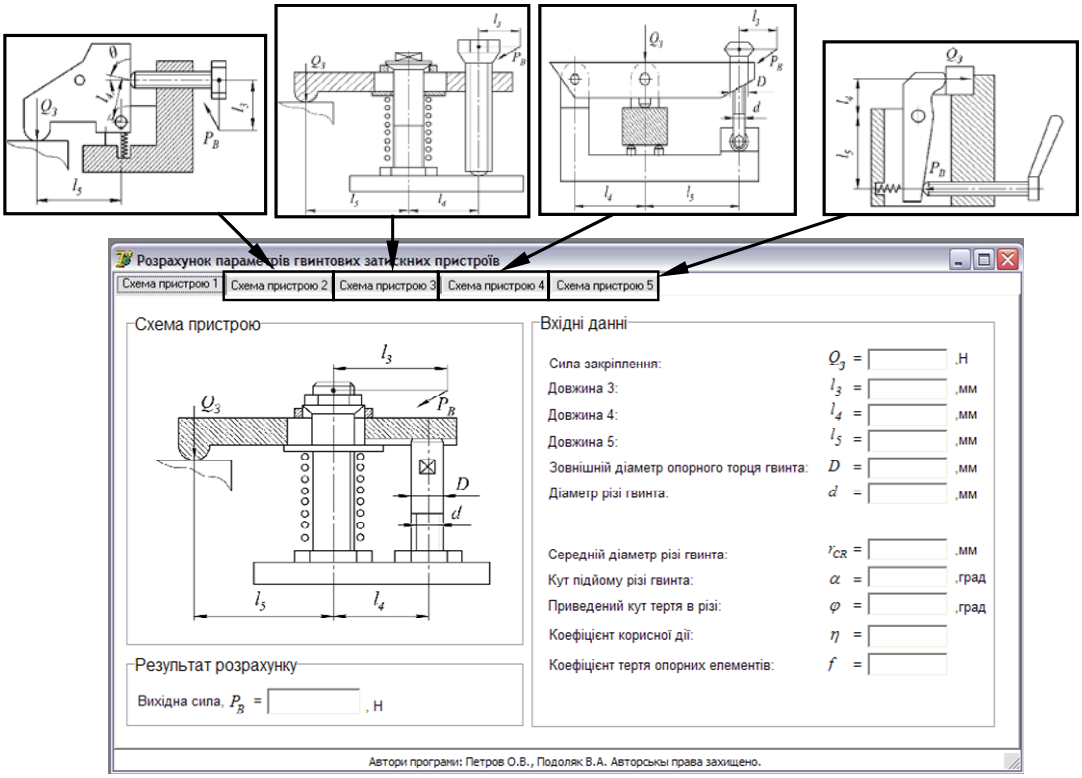


Рис. 3. Інтерфейс програми для розрахунку параметрів затискних пристроїв гвинтового типу

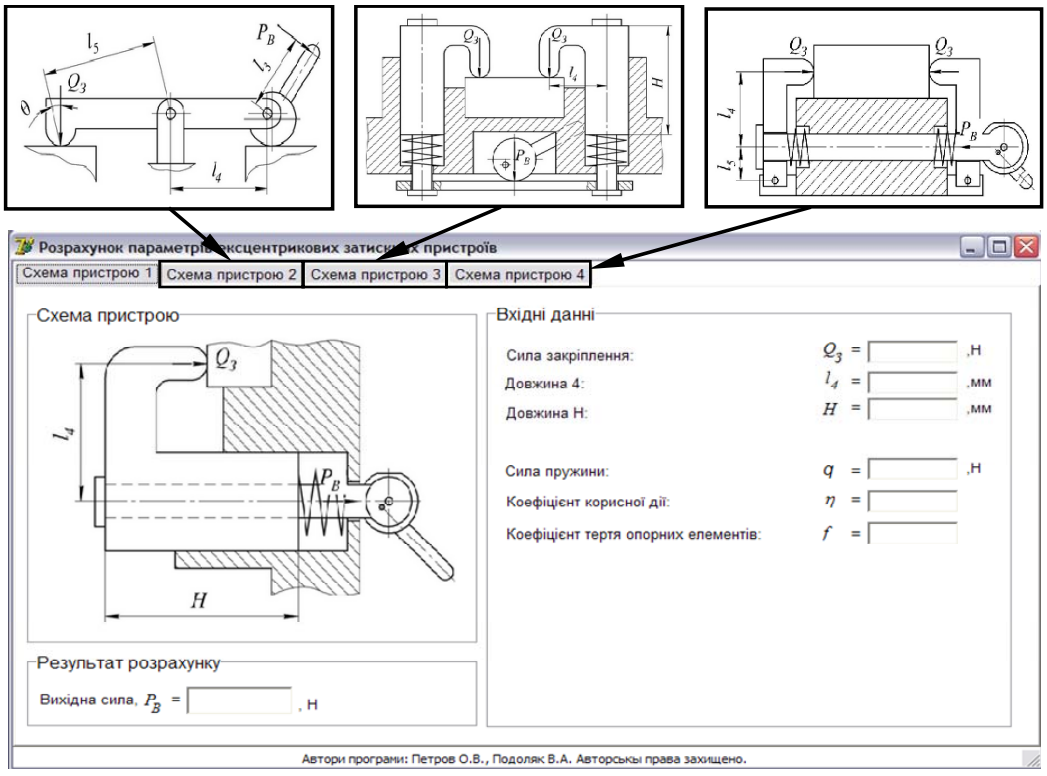


Рис. 4. Інтерфейс програми для розрахунку параметрів затискних пристроїв ексцентрикового типу

На рис. 5 представлена програма, що призначена для розрахунку параметрів комбінованих затискних пристроїв на основі пневматичного приводу та вихідного зусилля P_B, необхідного для розрахунку та подальшого вибору діаметра пневматичного циліндра [8]. Програма містить шість відомих типових схем. Як і у попередній програмі після вибору необхідної схему та введення вхідних даних результати розрахунку величини вихідної сили з'являється автоматично в вікні «Результат розрахунку».

У представлених програмах розрахунку параметрів затискних пристроїв результати розрахунку відображається автоматично, що дозволяє виконувати підбір вхідних даних, виходячи з умов конструктивної доцільності. Наприклад здійснювати вибір найбільш раціональної величину діаметра гвинта, довжин ланок та інших параметрів.

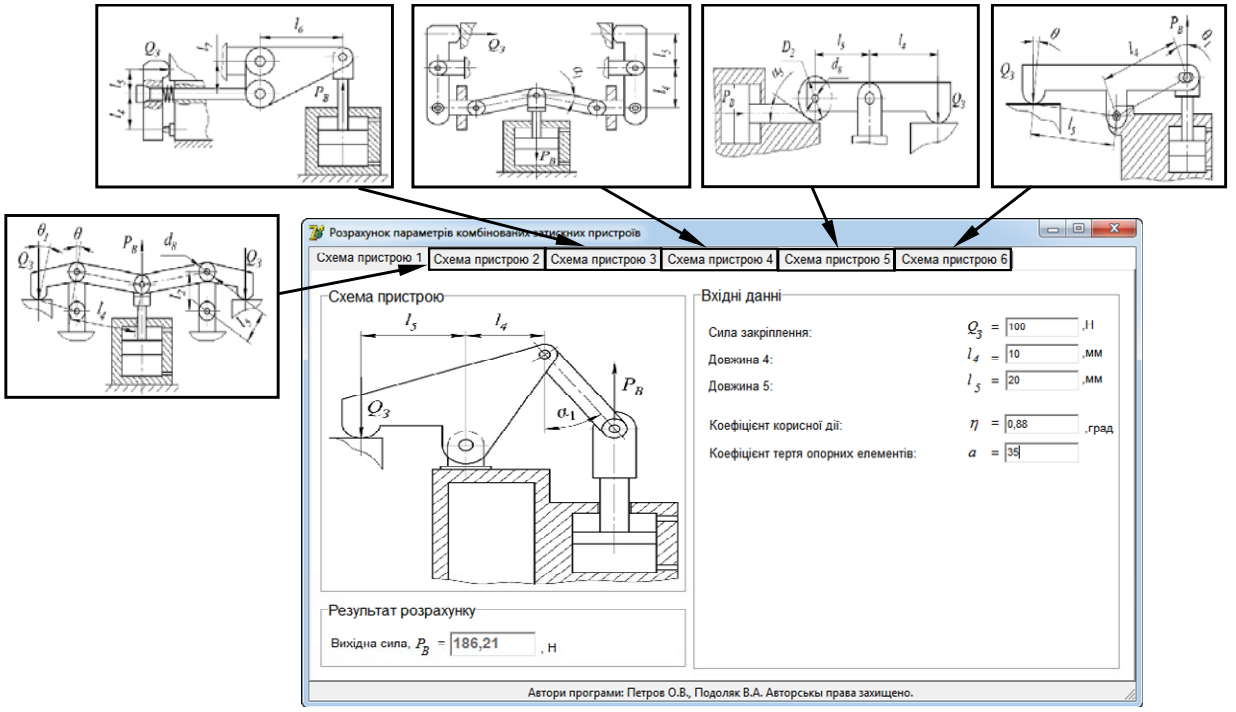


Рис. 5. Інтерфейс програми для розрахунку параметрів затискних пристроїв комбінованого типу

Висновки

Розроблено програми для визначення сили закріплення деталі під час виконання операцій свердління та фрезерування, в яких використовуються відомі схеми різання, а також автоматизовано процес вибору і розрахунку коефіцієнтів запасу та тертя, що дозволяє зменшити час проведення розрахунків силових параметрів верстатних пристосувань.

Розроблено програми для визначення параметрів та вихідного зусилля гвинтових, ексцентрикових та комбінованих затискних пристроїв, що дозволяє зменшити час проведення передпроектних розрахунків, а також обґрунтовано та швидко приймати рішення щодо вибору конструктивних параметрів верстатних пристосувань.

Література

1. Станочные приспособления : справочник : в 2 т. Т. 1 / редкол. : Вардашкин Б. Н. (председатель) [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 692 с.

2. Горохов В. А. Проектирование и расчет приспособлений : учебное пособие для студентов вузов машиностроительных спец. / Горохов В. А. – Минск : Выш. школа, 1986. – 238 с.

3. Сухоруков С.І. Сучасні перспективи розвитку систем автоматизованого проектування технологічної оснастки / С.І. Сухоруков, О.В. Петров, Д.С. Осіпов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2011. – № 6. – С. 156–159.

4. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 50294. Комп'ютерна програма «Визначення сил закріплення заготовки при свердлінні» / О.В. Петров, С.І. Сухоруков, М.В. Трофимчук. – Зареєстр. 18.07.2013.

5. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 55184. Комп'ютерна програма «Визначення сил закріплення заготовок при фрезеруванні» / О.В. Петров, С.І. Сухоруков, М. В. Трофимчук, Є.О. Федотенков. – Зареєстр. 05.06.2014.

6. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 54612. Комп'ютерна програма «Розрахунок параметрів комбінованих-гвинтових затискних пристроїв» / О.В. Петров, В.А. Подоляк, О.І. Юхимчук. – Зареєстр. 06.05.2014.

7. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 54613. Комп'ютерна програма «Розрахунок параметрів комбіновано-ексцентрикових затискних пристроїв» / О.В. Петров, В.А. Подоляк, О.І. Юхимчук. – Зареєстр. 06.05.2014.

8. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 54614. Комп'ютерна програма «Розрахунок параметрів комбінованих затискних пристроїв» / О.В. Петров, В.А. Подоляк, Є.О. Федотенков. – Зареєстр. 06.05.2014.

Рецензія/Peer review : 16.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., професор, Сивак І.О.

УДК: 621.81 (075.3)

Г.А. АВАНЕС'ЯНЦ
Одесская национальная академия пищевых технологий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ УСИЛИЙ НА ДИСКАХ ШКИВОВ КЛИНОРЕМЕННЫХ ВАРИТОРОВ И КООРДИНАТ ТОЧЕК ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

Надежность работы клиноременных вариаторов во многом зависит от состояния и конструкции направляющих подвижных дисков шкивов, что требует их соответствующего расчета. В статье приведены расчетные схемы раздвижных шкивов клиноременного вариатора привода технологических машин. Дан анализ распределения усилий, действующих по дуге обхвата ремнем шкивов. Решена задача по определению радиальных усилий, действующих со стороны клинового ремня на диски регулируемых шкивов и координат точек их приложения. Полученные данные необходимы для точного расчета направляющих подвижных дисков клиноременных вариаторов.

Ключевые слова: ремень, вариатор, радиальные усилия, координаты, определение.

GEORGY AZATOVICH AVANESYANC
Odessa national academy of food technologies

DEFINITION OF RADIAL FORCES ON DISKS OF THE V-BELT VARIATORS PULLEY AND COORDINATES OF THE POINTS OF APPLICATION

Abstract *– Reliability of work of the v-belt variator largely depends on the state and construction of the rails of pulleys movable disks that requires their respective calculation. The calculation schemesof the split pulleys of the v-belt variator of technological machines drive, have been given in the article. The analysis of distribution of the forces acting along the arc of pulleys holding bel, hase been giving. The problem of determining the radial force, acting on the part of the v-belt to the disks of the regulated pulley drives and coordinates of points of their application, hase been solved. The obtained data are necessary for the accurate calculation of the rails of movable disks of the needed of the v-belt variators.*

Keywords: belt, variator, radial forces, coordinates, calculation.

Одним из важных условий надежной работы клиноременных вариаторов является состояние направляющих подвижных дисков, которые в процессе эксплуатации испытываю сложное напряженное состояние. Напряжения на поверхности контакта диск – направляющие вала являются следствием действия, как распорных усилий, так и радиальных сил, действующих со стороны ремня на диски шкивов. Поэтому определение радиальных усилий по величине и координат точек их приложения являются необходимыми данными для расчета направляющих дисков шкивов.

Положим, что равнодействующая радиальных усилий $q(\varphi)$, распределенных по дуге обхвата α_{10} и действующих со стороны ремня на диски ведомого шкива, без учета сил инерции ремня I_1 равна H_1. Согласно расчетным схемам (рис. 1 и 2) и условия равновесия элемента I ремня на дуге скольжения получаем:

$$dH_{1c} = F\frac{d\varphi}{2}.$$

Для определения составляющей H_{1c} радиальной силы H_1, приходящейся на дугу скольжения, представим ее в виде проекций на координатные оси (без учета знака проекций):

$$dH_{1cy} = \frac{1}{2}F\cos\varphi d\varphi; \quad (1)$$

$$dH_{1cz} = \frac{1}{2}F\sin\varphi d\varphi. \quad (2)$$

Используя известное соотношение [1]

$$F = F_2 + F_t\frac{e^{-f'(\varphi-\alpha_{1n})}-1}{e^{-f'\alpha_{1c}}-1}$$

равенства (1) и (2) преобразуются к виду:

$$dH_{1cy} = \frac{1}{2}(F_2 + \mathrm{F}_t\frac{e^{f'(\alpha_{1n}-\varphi)}-1}{e^{-f'\alpha_{1c}}-1})\cos\varphi d\varphi;$$

$$dH_{1cz} = \frac{1}{2}(F_2 + \mathrm{F}_t\frac{e^{f'(\alpha_{1n}-\varphi)}-1}{e^{-f'\alpha_{1c}}-1})\sin\varphi d\varphi.$$

В приведенных формулах:

α_{1c} – угол дуги скольжения на ведомом шкиве;

α_{1n} – угол дуги покоя;

$f' = f_R / \cos\gamma$ – приведенный коэффициент трения;

f_R – физический коэффициент трения между ремнем и дисками шкива в радиальном направлении.

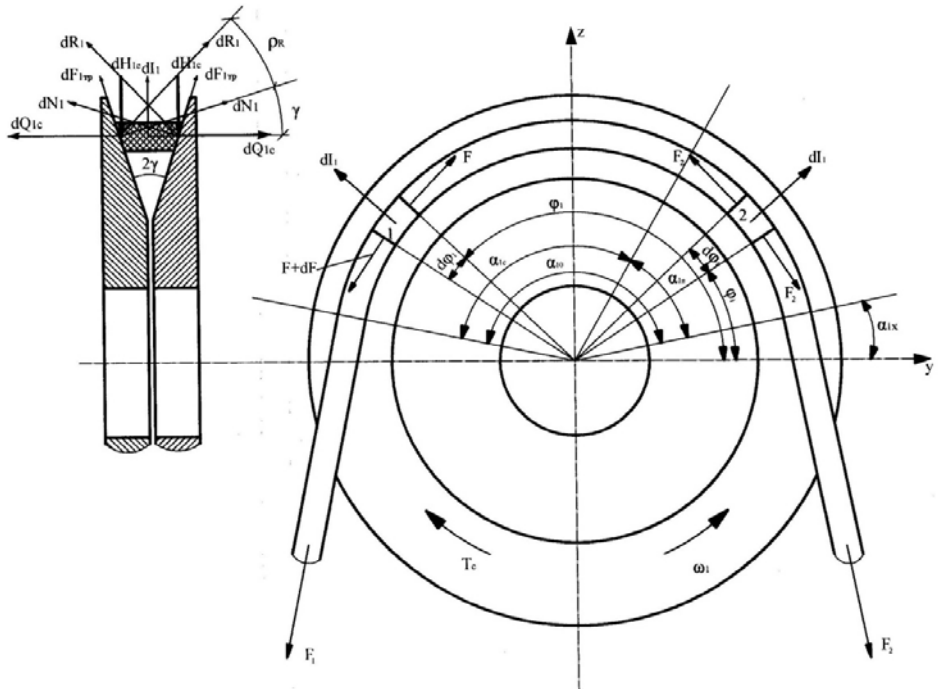


Рис. 1. Расчетная схема к определению радиальных усилий

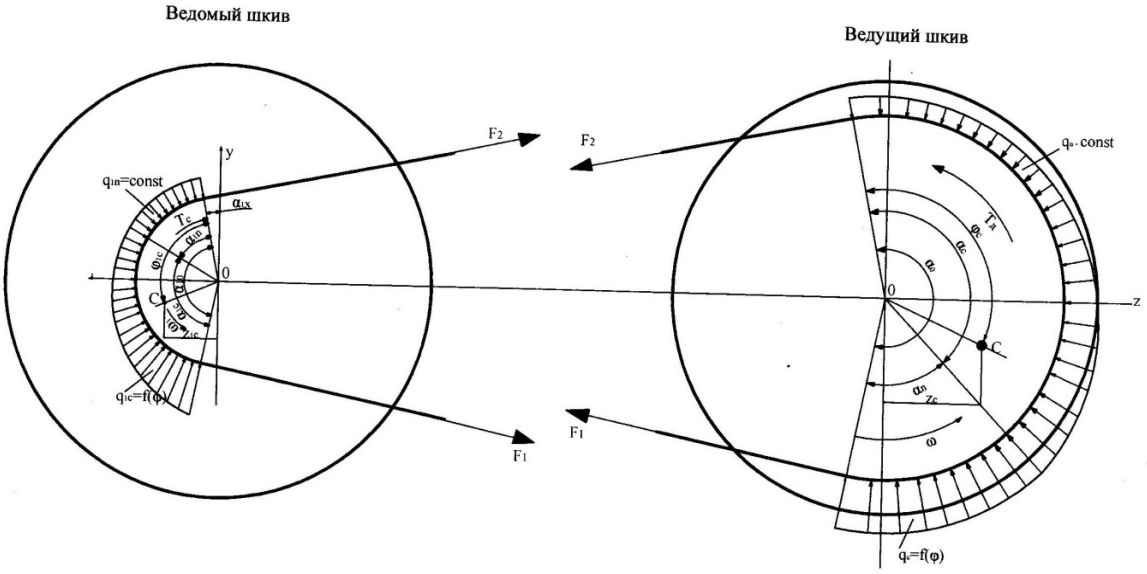


Рис. 2. Эпюра распределенных радиальных усилий на дисках шкивов вариатора

Проинтегрировав полученные выражения в пределах дуги скольжения α_{1c}, находим:

$$H_{1cy} = F_2 \frac{\sin\alpha'_{10} - \sin\alpha'_{1n}}{2} + \frac{F_t}{2(1-e^{f'\alpha_{1c}})}\{e^{f'\alpha_{1c}}(\sin\alpha'_{1n} - \sin\alpha'_{10}) + \\ + \frac{\sin\alpha'_{10} - f'\cos\alpha'_{10} + e^{f'\alpha_{1c}}(f'\cos\alpha'_{1n} - \sin\alpha'_{1n})}{f'^2+1}\}; \quad (3)$$

$$H_{1cz} = F_2 \frac{\cos\alpha'_{1n} - \cos\alpha'_{10}}{2} + \frac{F_t}{2(1-e^{f'\alpha_{1c}})}\{e^{f'\alpha_{1c}}(\cos\alpha'_{10} - \cos\alpha'_{1n}) + \\ + \frac{-\cos\alpha'_{10} - f'\sin\alpha'_{10} + e^{f'\alpha_{1c}}(f'\sin\alpha'_{1n} + \cos\alpha'_{1n})}{f'^2+1}\}; \quad (4)$$

где $\alpha'_{10} = \pi - \alpha_{1x}$ (рис. 3); $\alpha'_{1n} = \alpha_{1n} + \alpha_{1x}$ и $\alpha_{1x} = \dfrac{\pi - \alpha_{10}}{2}$.

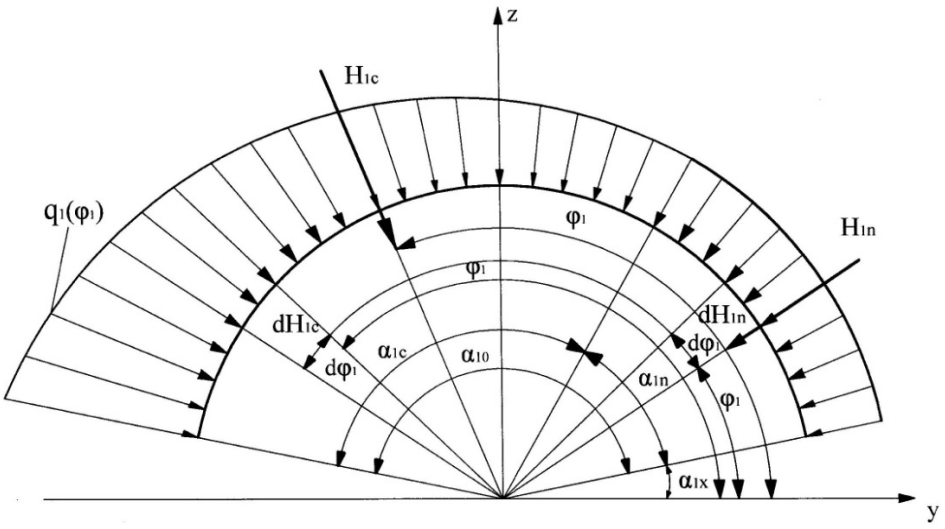


Рис. 3. К определению равнодействующей радиальных усилий на дисках ведомого шкива

На дуге покоя элементарная сила dH_{1n} определяется равенством:

$$dH_{1n} = F_2 \frac{d\varphi}{2}.$$

Разложим dH_{1n} на составляющие dH_{1ny} и dH_{1nz}:

$$dH_{1ny} = F_2 \cos\varphi \frac{d\varphi}{2};$$

$$dH_{1nz} = F_2 \sin\varphi \frac{d\varphi}{2}.$$

Проинтегрировав полученные выражения, находим, что:

$$H_{1ny} = F_2 \frac{\sin\alpha'_{1n} - \sin\alpha_{1x}}{2}; \quad (5)$$

$$H_{1nz} = F_2 \frac{\cos\alpha_{1x} - \cos\alpha'_{1n}}{2} \quad (6)$$

Согласно равенствам (3), (4), (5) и (6) проекции на координатные оси $0y$ и $0z$ равнодействующей сил, действующих со стороны ремня на диск в радиальном направлении, равны:

$$H_{1y} = \frac{F_t}{2(1 - e^{f'\alpha_{1c}})}\{e^{f'\alpha_{1c}}(\sin\alpha'_{1n} - \sin\alpha'_{10}) + \frac{\sin\alpha'_{10} - f'\cos\alpha'_{10} + e^{f'\alpha_{1c}}(f'\cos\alpha'_{1n} - \sin\alpha'_{1n})}{f'^2 + 1}\};$$

$$H_{1z} = \frac{F_t}{2(1 - e^{f'\alpha_{1c}})}\{e^{f'\alpha_{1c}}(\cos\alpha'_{10} - \cos\alpha'_{1n}) + \frac{-\cos\alpha'_{10} - f'\sin\alpha'_{10} + e^{f'\alpha_{1c}}(f'\sin\alpha'_{1n} + \cos\alpha'_{1n})}{f'^2 + 1}\} + F_0\cos\alpha_{1x}$$

Тогда равнодействующая радиальных сил H_1 на ведомом шкиве определится из равенства

$$H_1 = \sqrt{H_{1y}^2 + H_{1z}^2}. \quad (7)$$

Найдем координаты приложения силы H_1 на подвижном диске ведомого шкива. Согласно схеме (рис. 4) статический момент проекций H_{1z} относительно оси 0- H_{1z} равен:

$$H_{1z}\varphi_{1H} = \frac{1}{2}\int_0^{\alpha_{1n}} F_2\varphi\sin\varphi d\varphi + \frac{1}{2}\int_{\alpha_{1n}}^{\alpha_{10}} F\varphi\sin\varphi d\varphi.$$

Отсюда

$$\varphi_{1H} = \frac{1}{2H_{1z}}F_2\int_0^{\alpha_{10}}\varphi\sin\varphi d\varphi + \frac{F_t}{1 - e^{-f'\alpha_{1c}}}\int_{\alpha_{1n}}^{\alpha_{10}}(1 - e^{f'(\alpha_{1n}-\varphi)})\varphi\sin\varphi d\varphi.$$

Интегрируя полученное равенство, найдем аналитическое выражение для координатного угла φ_{1H} **:**

$$\varphi_{1H}=\frac{1}{2H_{1z}}\{F_2\left(\sin\alpha_{10}-\alpha_{10}\cos\alpha_{10}\right)+\frac{F_1}{e^{f'\alpha_{1c}}-1}[e^{f'\alpha_{1c}}(\sin\alpha_{10}-\alpha_{10}\cos\alpha_{10}-\sin\alpha_{1n}-$$
$$-\alpha_{1n}\cos\alpha_{1n})+\frac{2f'\cos\alpha_{10}+\left(f'^2-1\right)\sin\alpha_{10}-e^{f'\alpha_{1c}}\left[2f'\cos\alpha_{1n}+\left(f'^2-1\right)\sin\alpha_{10}\right]}{\left(f'^2+1\right)^2}+ \quad (8)$$
$$+\frac{(f'\sin\alpha_{10}-\cos\alpha_{10})\alpha_{10}-e^{f'\alpha_{1c}}(\sin\alpha_{1n}+\cos\alpha_{1n})\alpha_{1n}}{f'^2+1}]\}.$$

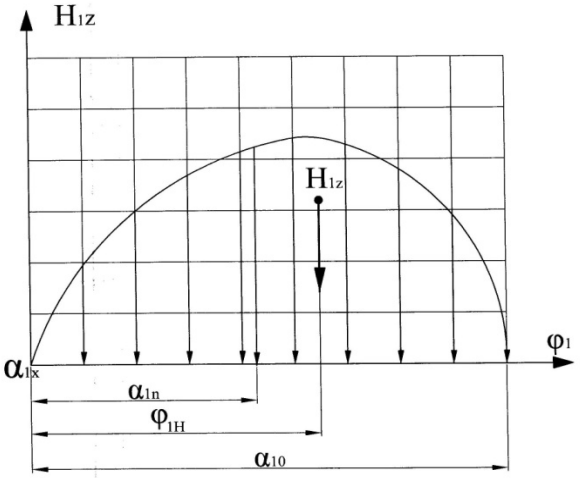


Рис. 4. К определению координаты φ_{1H} .

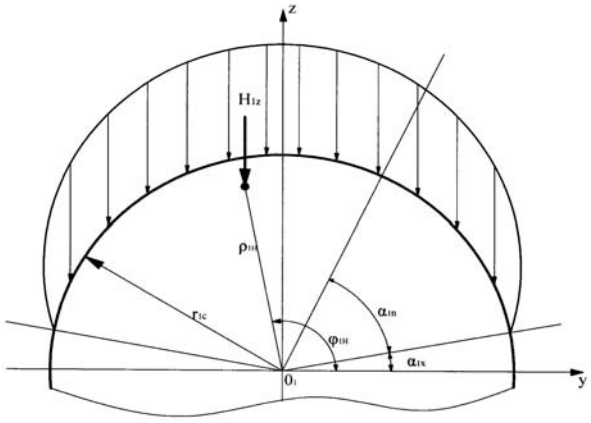


Рис. 5. К определению координаты ρ_{1H} .

С целью определения второй координаты ρ_{1H} точки приложения силы H_1 воспользуемся расчетной схемой (рис. 5) и приведем статический момент составляющей H_{1z} относительно оси шкива:

$$H_{1z}\rho_{1H}\cos\varphi_{1H}=\frac{r_{1c}F_2}{2}\int_{\alpha_{1x}}^{\alpha'_{10}}\sin\varphi\cos\varphi d\varphi+\frac{F_t r_{1c}}{2(1-e^{-f'\alpha_{1c}})}\int_{\alpha'_{1n}}^{\alpha'_{10}}(1-e^{-f'(\alpha_{1n}-\varphi)})\sin\varphi\cos\varphi d\varphi.$$

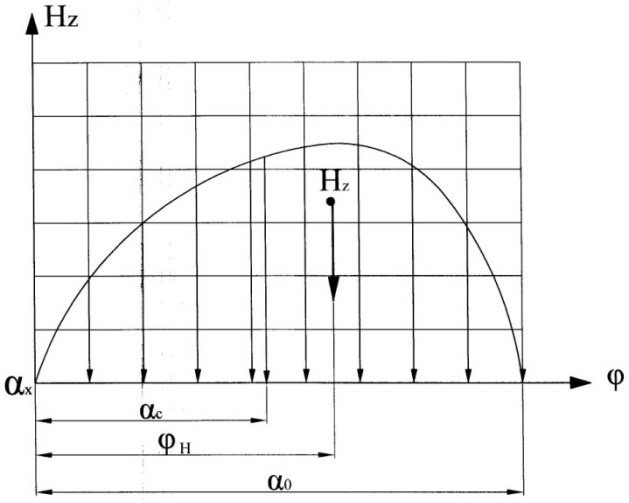


Рис. 6. К определению координаты φ_H

Отсюда следует, что

$$\rho_{1H}=\frac{F_t r_{1c}}{4\,\mathrm{H}_{1z}(1-e^{-f'\alpha_{1c}})\cos\varphi_{1H}}[e^{f'\alpha_{1c}}\frac{\cos2\alpha'_{1n}-\cos2\alpha'_{10}}{2}+$$
$$+\frac{f'\sin2\alpha'_{10}-2\cos2\alpha'_{10}-e^{f'\alpha_{1c}}(f'\sin2\alpha'_{10}-2\cos2\alpha'_{10})}{f'^2+4}. \quad (9)$$

Аналогично определяется равнодействующая H сил, действующих со стороны ремня на подвижный диск ведущего шкива:

$$H = \sqrt{H_y^2 + H_z^2} \tag{10}$$

Здесь на основании расчетной схемы (рис. 2):

$$H_y = \frac{F_t}{2(1-e^{f'\alpha_c})}\{\sin\alpha_0' - \sin\alpha_c' + \frac{\sin\alpha_c' - f'\cos\alpha_c' + e^{f'\alpha_c}(f'\cos\alpha_x - \sin\alpha_x)}{f'^2+1}\};$$

$$H_z = \frac{F_t}{2(1-e^{f'\alpha_c})}\{\cos\alpha_c' - 2e^{f'\alpha_c}\cos\alpha_x' + \cos\alpha_x - \frac{\cos\alpha_c' + f'\sin\alpha_c' - e^{f'\alpha_c}(f'\sin\alpha_x + \cos\alpha_x)}{f'^2+1}\} + F_2\cos\alpha_x.$$

где $\alpha_0 = \pi - \alpha_x;$ $\alpha_c' = \alpha_c + \alpha_x;$ $\alpha_x = 0{,}5(\pi - \alpha_0)$.

Легко найти, что координаты φ_H и ρ_H точки приложения силы H определяются по следующим зависимостям:

$$\rho_H = \frac{F_t r_c}{4H_z(e^{f'\alpha_c}-1)\cos\varphi_H}[\frac{\cos 2\alpha_0' - \cos 2\alpha_c'}{2} + \frac{f'\sin 2\alpha_c' - 2\cos 2\alpha_c' - e^{f'\alpha_c}(f'\sin 2\alpha_0' - 2\cos 2\alpha_($$

(11)

Согласно расчетной схеме, приведенной на рис. 5 находим:

$$\varphi_H = \frac{F_2}{2H_{1z}}\{(\sin\alpha_c - \alpha_c\cos\alpha_c) + m[(\sin\alpha_0 - \alpha_0\cos\alpha_0) + \\ + \frac{2f'(\cos\alpha_{1n} - m) + (f'^2-1)\sin\alpha_c}{(f'^2+1)^2} + \frac{(f'\sin\alpha_c + \cos\alpha_c)\alpha_c}{f'^2+1}]\}. \tag{12}$$

Кривые (рис. 7 даны при $i_в = 1{,}0$ и $f_R = 0{,}37$), построенные в результате проведенных расчетов по формулам (7) и (10), позволяют сделать важный вывод о том, что радиальные усилия, действующие со стороны клинового ремня на диски шкива, не остаются постоянными, как принято было считать, а существенно зависят от передаваемой нагрузки и при одном и том же значении ψ_T радиальное давление на ведущем шкиве больше, чем на ведомом.

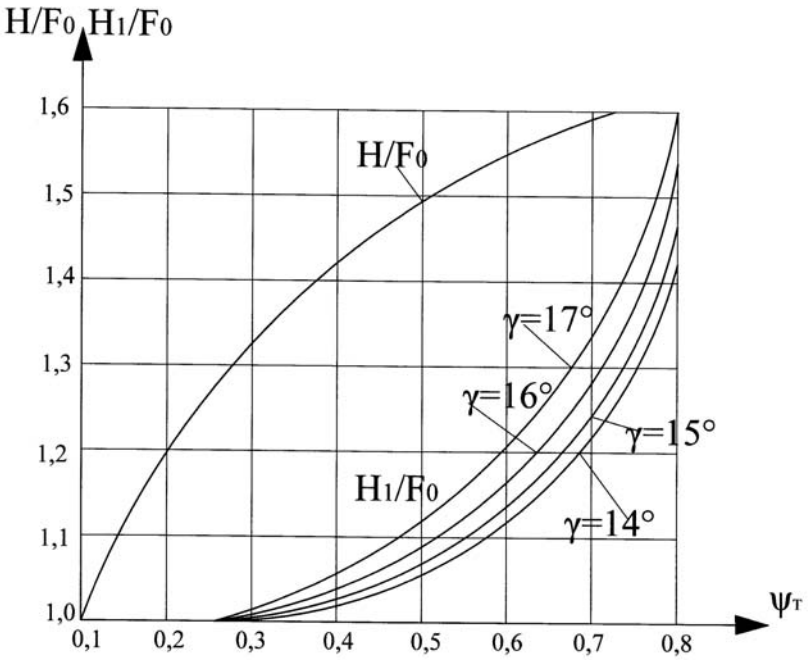


Рис. 7. Графики изменения радиальных усилий

Расчеты также показали, что угол профиля канавки шкива оказывают влияние на величину H_1, а на ведущем шкиве влияние γ не существенно, поэтому на рис. 7 показана одна кривая изменения $\frac{H}{F_0} = f(\psi_T)$ для углов γ, равных 14°, 15°, 16° и 17°.

Литература

1. Мальцев В.Ф. Определение распорных усилий на дисках шкивов клиноременных передач /П.А. Ковалев, А.Г. Аванесьянц // сб. «Детали машин», Техника. – 1974. - № 19 – С 46 - 52.
2. Пронин Б. А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи /Б. Пронин, Г. Ревков. – М.:Машиностроение, 1980. – 320 с.
3. Мальцев В.Ф. Определение распорных усилий клиноременных вариаторов со стандартными ремнями / В. Мальцев, Г. Остапенко // В кн. Передаточные механизмы, М. Машиностроение. – 1966. –С 17 – 23.

Рецензія/Peer review : 12.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Гапонюк О.И.

УДК 621.01

В.О. ХАРЖЕВСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

МЕТОДИКА ПЕРЕВІРКИ НАЯВНОСТІ ДОТИКУ 5-ГО ПОРЯДКУ У СИНТЕЗІ ВАЖІЛЬНИХ КРУГОВИХ НАПРЯМНИХ МЕХАНІЗМІВ

В роботі розглядається питання синтезу важільних кругових напрямних механізмів з використанням методів кінематичної геометрії, що полягають у пошуку кратних вузлів інтерполяції у шатунній площині, які відповідають певному порядку дотику шатунної кривої до дуги кола. Для шарнірного чотириланкового механізму максимально можливим порядком дотику є п'ятий, що відповідає наявності шестикратного вузла інтерполяції і дозволяє отримати ділянки наближення значної тривалості та точності. Розглядається метод, що дозволяє перевірити умови наявності дотику 5-го порядку для шатунних точок механізму.

Ключові слова: важільні механізми, кругові напрямні механізми, синтез, дотик 5-го порядку, шестикратні вузли інтерполяції.

V.O. KHARZHEVSKYI
Khmelnytskyi National University

METHOD OF THE VERIFICATION OF THE 5TH ORDER TANGENCY EXISTENCE FOR THE SYNTHESIS OF CIRCULAR PATH GENERATING LINKAGE MECHANISMS

Abstract – The article is dedicated to the synthesis of the path generating linkage mechanisms which coupler points trace coupler curves with the approximation of the defined parts to the arc of the circle. These mechanisms have wide application in modern machine building. To design such mechanisms methods of the kinematic geometry of the six infinitesimally close positions can be used. To solve this task, sixfold interpolation nodes of the coupler plane can be used to provide tangency of the 5th order between the coupler curve and approximation arc in these points. It means that coupler curve and the approximation arc not only intersect in these points, but also have five equal derivatives. To verify such case existence for the four-bar linkage, the corresponding method was developed and presented in the paper.

Keywords: linkages, circular path generating mechanisms, synthesis, tangency of the 5th order, sixfold interpolation nodes.

Для забезпечення переміщення виконавчих органів машин за заданою траєкторією можуть використовуватись, як відомо, важільні напрямні механізми. Крім того, на основі цих механізмів можна проектувати механізми із зупинкою вихідної ланки. Використання важільних механізмів у сучасних машинах має ряд суттєвих переваг, зокрема відсутність вищих кінематичних пар, що забезпечує більшу надійність та довговічність, наявність геометричного замикання ланок, більша навантажувальна здатність тощо. Проте більш широке впровадження таких механізмів на практиці обмежується їх досить складним синтезом. Як відомо, для цього можна використати методи найкращого наближення за Чебишевим, що отримали розвиток в роботах Блоха, Кіницького [2], Саркісяна [7], Гассманна [5], а також теоретичні положення кінематичної геометрії, започатковані Бурместером. Ідеї Бурместера знайшли розвиток в роботах вчених німецької школи синтезу, зокрема Бєйера, Ліхтенхельдта, Мюллера та інших. Крім того, існує ряд сучасних робіт, присвячених розвитку цього напрямку, зокрема роботи, Уанга [9], Іна, Хана [8], МакКарті [6], а також багато інших. Основною ідеєю у синтезі напрямних механізмів методами кінематичної геометрії є пошук у шатунній площині механізму кратних вузлів інтерполяції, що характеризуються тим, що в даних точках збігаються не тільки шатунна крива та замінювальна функція, але й їх похідні до порядку n включно: в такому випадку спостерігається порядок дотику двох кривих кратності n.

Шатунна крива шарнірного чотириланкового механізму є алгебраїчною трициркулярною кривою 6-го порядку, максимальна кількість її точок перетину з дугою кола дорівнює шести. У випадку, коли всі шість точок збігаються в одну, така точка буде шестикратним вузлом інтерполяції, що характеризується рівністю перших п'яти похідних функцій шатунної кривої та дуги кола в даній точці. Це забезпечить наявність в деякому околі від такої точки ділянки приблизно постійної кривизни, а отже механізм, синтезований на базі такої точки, буде круговим напрямним механізмом з високою точністю наближення, оскільки в такому випадку для синтезу використовується вузол інтерполяції, що має максимально можливу

кратність для шатунної кривої несиметричного шарнірного чотириланкового механізму.

Метою даної роботи є розробка методу для визначення наявності дотику 5-го порядку при проведенні синтезу кругових напрямних механізмів, тобто перевірки умови існування шестикратних вузлів інтерполяції (точок Бурместера 5-го порядку) в певних положеннях шатунної площини механізму.

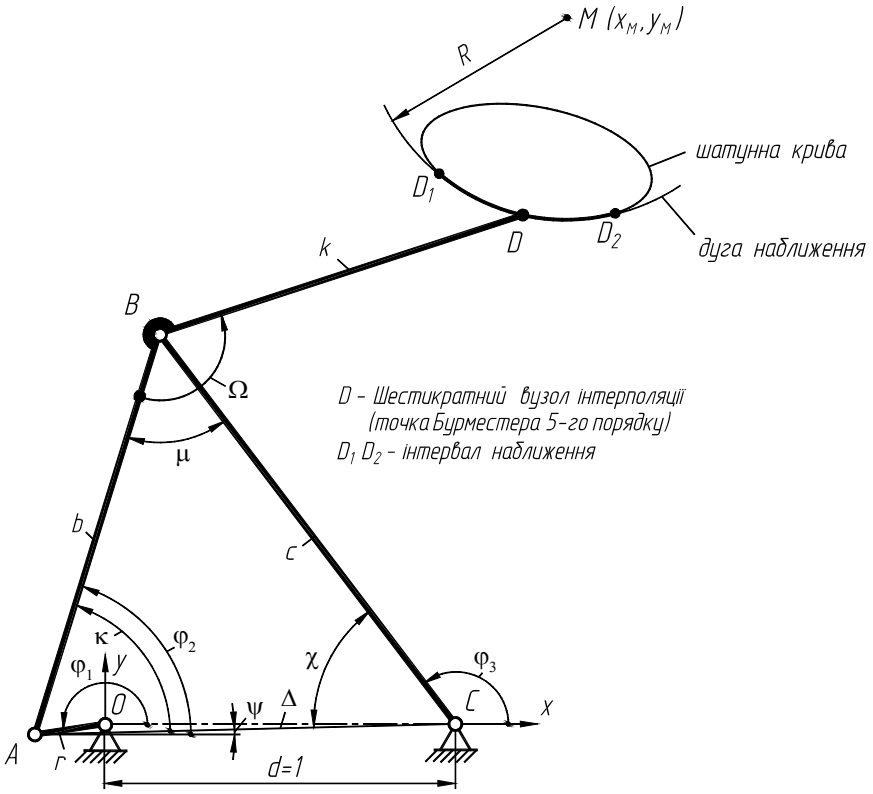


Рис. 1. Важільний круговий напрямний механізм та шестикратний вузол інтерполяції його шатунної площини (точка Бурместера 5-го порядку)

На рис. 1 зображено шарнірний чотириланковий механізм, точка *D* якого описує деяку шатунну криву, форма якої буде залежати від параметрів базового механізму, а саме: довжин ланок кривошипа $r = l_{OA}$, шатуна $b = l_{AB}$, коромисла $c = l_{BC}$, а також від положення шатунної точки *D*, що визначається величиною $k = l_{BD}$ та відповідно кутом злому шатуна Ω. При проведенні розрахунків, відповідно до рекомендацій [1], приймаємо відстань між осями нерухомих шарнірів $d = l_{OC}$ сталою і рівною одиниці, оскільки отримати механізми з іншими величинами міжосьової відстані завжди можна за допомогою зміни інших параметрів кінематичної схеми. При дослідженні механізмів рух точки у нерухомій системі координат *xOy* будемо представляти у параметричній формі:

$$x_D = x_D(\varphi_1);\ y_D = y_D(\varphi_1), \tag{1}$$

де φ_1 – параметр (узагальнена координата), що в даному випадку є кутом повороту кривошипа (змінюється в межах від 0 до 2π). Відповідно до загальних умов дотику плоских кривих, для того, щоби така крива забезпечувала в деякій точці траєкторії дотик не нижче 3-го порядку зі своїм колом кривизни, повинна забезпечуватись наступна умова [1]:

$$N_3 = \left(x_D'^{\,2} + y_D'^{\,2}\right)\left(x_D''' y_D' - x_D' y_D'''\right) + 3\left(x_D' x_D'' + y_D' y_D''\right)\left(x_D' y_D'' - x_D'' y_D'\right) = 0; \tag{2}$$

Продиференціювавши двічі рівняння (2), отримаємо умови наявності в даній точці дотик відповідно 4- та 5-го порядків кривої з колом кривизни, тобто в такій точці збігаються відповідно п'ять та шість нескінченно близьких точки траєкторії кривої та кола кривизни [1]:

$$N_4 = \left(x_D'^{\,2} + y_D'^{\,2}\right)\left(x_D^{IV} y_D' - x_D' y_D^{IV}\right) + \left[4\left(x_D' x_D''' + y_D' y_D'''\right) + 3\left(x_D'' + y_D''\right)\right]\left(x_D' y_D'' - x_D'' y_D'\right) = 0; \tag{3}$$

$$N_5 = \left(x_D'^{\,2} + y_D'^{\,2}\right)\left(x_D^{V} y_D' - x_D' y_D^{V}\right) + \left[5\left(x_D' x_D^{IV} + y_D' y_D^{IV}\right) + 10\left(x_D'' x_D''' + y_D'' y_D'''\right)\right]\left(x_D' y_D'' - x_D'' y_D'\right) = 0. \tag{4}$$

Таким чином, необхідною та достатньою умовою наявності дотику 5-го порядку шатунної кривої зі своїм колом кривизни в даній точці є одночасне виконання умов (2)–(4), тобто $N_3 = N_4 = N_5 = 0$.

Для визначення величин, що входять у формули (2)–(4), необхідно провести кінематичне дослідження механізму (рис. 1), яке будемо проводити відповідно до [3]. Визначимо координати точки *A* кривошипа:

$$x_A = r\cos\varphi_1;\ y_A = r\sin\varphi_1; \tag{5}$$

Величина кутів φ_2 та φ_3, що визначають положення шатуна *b* та коромисла *c* механізму:

$$\varphi_2 = \psi + \kappa;\ \varphi_3 = \psi - \chi + \pi,\ \text{де}\ \chi = \pi - \kappa - \mu;\ \psi = \operatorname{arctg}\left[y_A/(x_A - 1)\right]. \tag{6}$$

Для розрахунку шуканих кутів за формулами (6), додатково визначаємо наступні величини:

$$\mu = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - \Delta^2}{2bc}\right);\ \kappa = \arccos\left(\frac{b^2 + \Delta^2 - c^2}{2b\Delta}\right);\qquad \Delta = \sqrt{(1 - x_A^2) + y_A^2}. \tag{7}$$

Координати точки *B* механізму визначаємо наступним чином:

$$x_B = x_A + b\cos\varphi_2;\ y_B = y_B + b\sin\varphi_2. \tag{8}$$

Параметри шатунної точки *D* визначаємо за аналогічними формулами (як додаткову точку шатуна):

$$x_D = x_B + k\cos(\varphi_2 + \Omega - \pi);\ y_D = y_B + k\sin(\varphi_2 + \Omega - \pi). \tag{9}$$

Як видно з формул (2)-(4), для визначення шуканих величин необхідно розрахувати значення перших п'яти похідних від переміщень шатунної точки *D*. Формули для розрахунку перших чотирьох похідних від переміщень шатунної точки, а саме x_D', y_D', x_D'', y_D'', x_D''', y_D''', x_D^{IV}, y_D^{IV} розглядались нами у роботі [4]. Розглянемо визначення п'ятих похідних від переміщення точки *D* механізму. Для цього спочатку визначимо п'яті похідні від координат кривошипа x_A, y_A:

$$x_A^V = -r\sin\varphi_1;\ y_A^V = r\cos\varphi_1. \tag{10}$$

П'яті похідні від переміщень точки *B* механізму:

$$\left.\begin{aligned} x_B^V &= x_A^V + b\sin\varphi_2\left(10\varphi_2'''\varphi_2'^2 - \varphi_2'^5 + 15\varphi_2'\varphi_2''^2 - \varphi_2^V\right) - b\cos\varphi_2\left(5\varphi_2^{IV}\varphi_2' - 10\varphi_2''\varphi_2'^3 + 10\varphi_2''\varphi_2'''\right);\\ y_B^V &= y_A^V - b\cos\varphi_2\left(10\varphi_2'''\varphi_2'^2 - \varphi_2'^5 + 15\varphi_2'\varphi_2''^2 - \varphi_2^V\right) - 5b\sin\varphi_2\left(\varphi_2^{IV}\varphi_2' - 2\varphi_2''\varphi_2'^3 + 2\varphi_2''\varphi_2'''\right). \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Перші чотири похідні від кутів φ_2 та φ_3, які визначають положення відповідно шатуна *b* та коромисла *c* механізму, а саме величини $\varphi_2', \varphi_2'', \varphi_2''', \varphi_2^{IV}, \varphi_3', \varphi_3'', \varphi_3''', \varphi_3^{IV}$ наведені у роботі [4].

Відповідно, до [4], при розрахунку других похідних зазначених функцій, проводилась розбивка функції на простіші дроби та вводились наступні позначення:

$$\varphi_2'' = A + B - C + D;\ \varphi_3'' = F_1 + F_2 + F_3 - F_4, \tag{12}$$

де замінювальні коефіцієнти визначались таким чином:

$$A = \frac{x_A''\cos\varphi_3}{b\sin(\varphi_2 - \varphi_3)};\ B = A\operatorname{tg}\varphi_3\operatorname{tg}\varphi_1;\ C = \operatorname{ctg}(\varphi_2 - \varphi_3)\varphi_2'^2;\ D = \frac{c\varphi_3'^2}{b\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}; \tag{13}$$

$$F_1 = \frac{b\cos\varphi_2}{c\cos\varphi_3}A;\quad F_2 = \frac{B}{A}\operatorname{ctg}\varphi_3\operatorname{tg}\varphi_2 F_1;\ F_3 = \left(\frac{\varphi_3'}{\varphi_2'}\right)^2 C;\ \ F_4 = D\left(\frac{b\varphi_2'}{c\varphi'}\right)^2; \tag{14}$$

Значення п'ятої похідної φ_2^V, що входить у рівняння (11):

$$\varphi_2^V = A''' + B''' - C''' + D'''. \tag{15}$$

Величини, що входять у формулу (15), визначаються наступним чином:

$$A''' = A_1'' + A_2'' + A_3'';\ B''' = B_1'' + B_2'' + B_3'';\ C''' = C_1'' - C_2'' - C_3'';\ D''' = D_1'' + D_2''; \tag{16}$$

Коефіцієнти A_1'', A_2'', A_3'', необхідні для визначення величини A''', розраховуються за такими формулами:

$$A_1'' = \frac{-A''\sin 2\varphi_1 - 4\left(A' + A\operatorname{tg}\varphi_1\right)}{2\cos^2\varphi_1}; \tag{17}$$

$$A_2'' = -\operatorname{tg}\varphi_3\left(A''\varphi_3' + 2A'\varphi_3'' + A\varphi_3'''\right) - \frac{A\varphi_3'\left(2\varphi_3'^2\operatorname{tg}\varphi_3 + 3\varphi_3''\right) + 2A'\varphi_3'^2}{\cos^2\varphi_3}; \tag{18}$$

$$\begin{aligned} A_3'' &= \frac{A'A_3'}{A} - \left[A\left(\varphi_2''' - \varphi_3'''\right) - A'\left(\varphi_2'' - \varphi_3''\right)\right]\operatorname{ctg}(\varphi_2 - \varphi_3) + \\ &+ \frac{A_3}{A^2}\left[A''A - A'^2 + \frac{2A_3'A - A_3A'}{\cos^2(\varphi_2 - \varphi_3)}\right] + \left[\frac{A\left(\varphi_2'' - \varphi_3''\right)}{\sin^2(\varphi_2 - \varphi_3)} + \frac{2A_3^2\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{A\cos^3(\varphi_2 - \varphi_3)}\right]\left(\varphi_2' - \varphi_3'\right); \end{aligned} \tag{19}$$

Коефіцієнти B_1'', B_2'', B_3'', що входять у формулу (16) для визначення величини B''':

$$B_1'' = \frac{A'B'' + 2A''B' + A'''B}{A} - \frac{2B'A'^2 + 3A'A''B}{A^2} + \frac{2A'^3B}{A^3}; \tag{20}$$

$$B_2'' = \frac{2B'' - 4B'\operatorname{ctg}2\varphi_1}{\sin 2\varphi_1} - \frac{4\cos\varphi_2\left(B' - 2B\operatorname{ctg}2\varphi_2\right)}{\sin^2 2\varphi_1} + \frac{8B}{\sin^3 2\varphi_1}; \tag{21}$$

$$B_3'' = \frac{2\left(B''\varphi_3' + B\varphi_3'''\right) + 4B'\varphi_3''}{\sin 2\varphi_3} - \frac{4\varphi_3'\left(2B'\varphi_3' + 3B\varphi_3''\right)\left(2\cos^2\varphi_3 - 1\right)}{\sin^2 2\varphi_3} + \frac{4B\varphi_3'^3\left(\cos 4\varphi_3 + 3\right)}{\sin^3 2\varphi_3}; \tag{22}$$

Для визначення величини C''', що розраховується за (16), розраховуються наступні коефіцієнти:

$$C_1'' = C_1\left[\frac{\varphi_2^{IV}}{\varphi_2'} + \frac{C''}{C} - \left(\frac{\varphi_2'''}{\varphi_2''}\right)^2 - \left(\frac{C'}{C}\right)^2\right] + C_1'\left(\frac{\varphi_2'''}{\varphi_2''} + \frac{C'}{C}\right) - \frac{2C'\varphi_2''^2 + 4C\varphi_2''\varphi_2'''}{\varphi_2'^2} + 4C\left(\frac{\varphi_2''}{\varphi_2'}\right)^3; \tag{23}$$

$$\begin{aligned} C_2'' = {} & C_2\left[\frac{C''C - C'^2}{C^2} + \frac{\varphi_2''' - \varphi_3'''}{\varphi_2' - \varphi_3'} - \left(\frac{\varphi_2'' - \varphi_3''}{\varphi_2' - \varphi_3'}\right)^2\right] + C_2'\left(\frac{C'}{C} + \frac{\varphi_2'' - \varphi_3''}{\varphi_2' - \varphi_3'}\right) + \\ & + \frac{\left(\varphi_2' - \varphi_3'\right)^2\left(2C_2 - C'\right) - 2C\left(\varphi_2' - \varphi_3'\right)\left(\varphi_2'' - \varphi_3''\right)}{\sin^2\left(\varphi_2 - \varphi_3\right)}; \end{aligned} \tag{24}$$

$$C_3'' = \frac{2\left(C_3'\varphi_2'' + C_3\varphi_2'''\right)}{\varphi_2'} - \frac{2C_3\varphi_2''^2}{\varphi_2'^2} + \varphi_2'^2\left(\varphi_2''' - \varphi_3'''\right) + 2\varphi_2'\varphi_2''\left(\varphi_2'' - \varphi_3''\right); \tag{25}$$

Величини, що входять у формулу (16) для визначення коефіцієнта D''', розрахуються за формулами:

$$D_1'' = \frac{2\left(D''\varphi_3'' + D\varphi_3^{IV} + 2D'\varphi_3'''\right)}{\varphi_3'} - \frac{2\varphi_3''\left(D'\varphi_3'' + D\varphi_3'''\right)}{\varphi_3'^2} + \frac{D_1^2D' - 2D_1D_1'D}{2D^2}; \tag{26}$$

$$\begin{aligned} D_2'' = {} & D_2\left[\frac{D''}{D} + \frac{\varphi_2''' - \varphi_3'''}{\varphi_2' - \varphi_3'} - \left(\frac{D'}{D}\right)^2 - \left(\frac{\varphi_2''' - \varphi_3'''}{\varphi_2' - \varphi_3'}\right)^2\right] + D_2'\left(\frac{D'}{D} + \frac{\varphi_2'' - \varphi_3''}{\varphi_2' - \varphi_3'}\right) + \\ & + \frac{\left(D' + 2D_2\right)\left(\varphi_2' - \varphi'\right)^2 + 2D\left(\varphi_2' - \varphi_3'\right)\left(\varphi_2'' - \varphi_3''\right)}{\sin^2\left(\varphi_2 - \varphi_3\right)}; \end{aligned} \tag{27}$$

Таким чином, всі величини, необхідні для визначення п'ятої похідної φ_2^V, визначаються за наведеними вище формулами (15)–(27). Далі визначимо величину φ_3^V – п'яту похідну від кута, що визначає положення коромисла *c* механізму:

$$\varphi_3^V = F_1''' + F_2''' + F_3''' - F_4'''. \tag{28}$$

Величина F_1''', що входять у формулу (28), визначається як

$$F_1''' = F_{11}'' - F_{12}'' + F_{13}'', \tag{29}$$

де коефіцієнти, що входять у (29), можна розрахувати наступним чином:

$$F_{11}'' = \frac{2A'^3F_1}{A^3} - \frac{2A'^2F_1' + 3A'A''F_1}{A^2} + \frac{A'F_1'' + 2A''F_1' + A'''F_1}{A}; \tag{30}$$

$$F_{12}'' = \left[\frac{\varphi_2'''\varphi_2' - \varphi_2''^2}{\varphi_2'^2} + \frac{2\varphi_2'' - 4\varphi_2'^2\operatorname{ctg}2\varphi_2}{\sin 2\varphi_2} + \frac{F_1F_1'' - F_1'^2}{F_1^2} + \left(\frac{\varphi_2''}{\varphi_2'} + \frac{2\varphi_2'}{\sin 2\varphi_2} + \frac{F_1'}{F_1}\right)^2\right]\varphi_2'\operatorname{tg}\varphi_2F_1; \tag{31}$$

$$F_{13}'' = \left[\frac{\varphi_3'''\varphi_3' - \varphi_3''^2}{\varphi_3'^2} + \frac{2\varphi_3'' - 4\varphi_3'^2\operatorname{ctg}2\varphi_3}{\sin 2\varphi_3} + \frac{F_1F_1'' - F_1'^2}{F_1^2} + \left(\frac{\varphi_3''}{\varphi_3'} + \frac{2\varphi_3'}{\sin 2\varphi_3} + \frac{F_1'}{F_1}\right)^2\right]\varphi_3'\operatorname{tg}\varphi_3F_1; \tag{32}$$

Величина F_2''', що входять у формулу (28), визначається як

$$F_2''' = F_{21}'' + F_{22}'' - F_{23}'' + F_{24}'' - F_{25}'', \tag{33}$$

де коефіцієнти, що входять у (33), можна розрахувати наступним чином:

$$F_{21}'' = \frac{2F_2F_1'^3}{F_1^3} - \frac{2F_2'F_1'^2 + 3F_2F_1'F_1''}{F_1^2} + \frac{F_2F_1''' + F_1'F_2'' + 2F_2'F_1''}{F_1}; \tag{34}$$

$$F_{22}'' = \frac{2B'^3F_2}{B^3} - \frac{2B'^2F_2' + 3B'B''F_2}{B^2} + \frac{B'F_2'' + 2B''F_2' + B'''F_2}{B}; \tag{35}$$

$$F_{23}'' = \frac{2A'^3F_2}{A^3} - \frac{2A'^2F_2' + 3A'A''F_2}{A^2} + \frac{A'F_2'' + 2A''F_2' + A'''F_2}{A}; \tag{36}$$

$$F_{24}'' = \frac{2\varphi_2'F_2}{\sin 2\varphi_2}\left[\frac{4\varphi_2'^2 - \varphi_2''\sin 4\varphi_2}{\sin^2 2\varphi_2} + \frac{\varphi_2'''\varphi_2' - \varphi_2''^2}{\varphi_2'^2} + \frac{F_2''F_2 - F_2'^2}{F_2^2} + \left(\frac{F_2'}{F_2} + \frac{\varphi_2''}{\varphi_2'} - 2\varphi_2'\operatorname{ctg}2\varphi_2\right)^2\right]; \tag{37}$$

$$F_{25}'' = \frac{2\varphi_3'F_2}{\sin 2\varphi_3}\left[\frac{4\varphi_3'^2 - \varphi_3''\sin 4\varphi_3}{\sin^2 2\varphi_3} + \frac{\varphi_3'''\varphi_3' - \varphi_3''^2}{\varphi_3'^2} + \frac{F_2''F_2 - F_2'^2}{F_2^2} + \left(\frac{F_2'}{F_2} + \frac{\varphi_3''}{\varphi_3'} - 2\varphi_3'\operatorname{ctg}2\varphi_3\right)^2\right]. \tag{38}$$

Величина F_3''', що входять у формулу (28), визначається як

$$F_3''' = F_{31}'' - F_{32}'' + F_{33}'', \tag{39}$$

де коефіцієнти, що входять у (39), можна розрахувати наступним чином:

$$F_{31}'' = \frac{2C'^3F_3}{C^3} - \frac{2C'^2F_3' + 3C'C''F_3}{C^2} + \frac{C'F_3'' + 2C''F_3' + C'''F_3}{C}; \tag{40}$$

$$F_{32}'' = \frac{2\left(F_3''\varphi_2'' + 2F_3'\varphi_2''' + F_3\varphi_2^{IV}\right)}{\varphi_2'} - \frac{2\varphi_2''\left(2F_3'\varphi_2'' + 3F_3\varphi_2'''\right)}{\varphi_2'^2} + 4F_3\left(\frac{\varphi_2''}{\varphi_2'}\right)^3; \tag{41}$$

$$F_{33}'' = \frac{2\left(F_3''\varphi_3'' + 2F_3'\varphi_3''' + F_3\varphi_3^{IV}\right)}{\varphi_3'} - \frac{2\varphi_3''\left(2F_3'\varphi_3'' + 3F_3\varphi_3'''\right)}{\varphi_3'^2} + 4F_3\left(\frac{\varphi_3''}{\varphi_3'}\right)^3. \tag{42}$$

Величина F_4''', що входять у формулу (28), визначається як

$$F_4''' = F_{41}'' - F_{42}'' + F_{43}'', \tag{43}$$

де коефіцієнти, що входять у (43), можна розрахувати наступним чином:

$$F_{41}'' = \frac{2D'^3F_4}{D^3} - \frac{2D'^2F_4' + 3D'D''F_4}{D^2} + \frac{D'F_4'' + 2D''F_4' + D'''F_4}{D}; \tag{44}$$

$$F_{42}'' = \frac{2\left(F_4''\varphi_3'' + 2F_4'\varphi_3''' + F_4\varphi_3^{IV}\right)}{\varphi_3'} - \frac{2\varphi_3''\left(2F_4'\varphi_3'' + 3F_4\varphi_3'''\right)}{\varphi_3'^2} + \frac{4F_4\varphi_3''^3}{\varphi_3'^3}; \tag{45}$$

$$F_{43}'' = \frac{2\left(F_4''\varphi_2'' + 2F_4'\varphi_2''' + F_4\varphi_2^{IV}\right)}{\varphi_2'} - \frac{2\varphi_2''\left(2F_4'\varphi_2'' + 3F_4\varphi_2'''\right)}{\varphi_2'^2} + \frac{4F_4\varphi_2''^3}{\varphi_2'^3}; \tag{46}$$

Таким чином, всі величини, необхідні для визначення п'ятої похідної φ_3^V, визначаються наведеними вище формулами (28)-(46). Далі визначаємо п'яту похідну від переміщення шатунної точки *D* механізму:

$$\left.\begin{aligned} x_D^V &= x_B^V - k\sin(\varphi_2+\Omega)\left(10\varphi_2'''\varphi_2'^2 - \varphi_2'^5 + 15\varphi_2'\varphi_2''^2 - \varphi_2^V\right) + 5k\cos(\varphi_2+\Omega)\left(\varphi_2^{IV}\varphi_2' - 2\varphi_2''\varphi_2'^3 + 2\varphi_2''\varphi_2'''\right);\\ x_D^V &= x_B^V + k\cos(\varphi_2+\Omega)\left(10\varphi_2'''\varphi_2'^2 - \varphi_2'^5 + 15\varphi_2'\varphi_2''^2 - \varphi_2^V\right) + 5k\sin(\varphi_2+\Omega)\left(\varphi_2^{IV}\varphi_2' - 2\varphi_2''\varphi_2'^3 + 2\varphi_2''\varphi_2'''\right).\end{aligned}\right\} \tag{47}$$

Покажемо приклад проведення розрахунків за вищевказаними формулами для механізму, зображеного на рис. 1. В якості шатунної точки *D* механізму прийнято шестикратний вузол інтерполяції, яким є точка Бурместера 5-го порядку. Параметри базового чотириланкового механізму були прийняті наступні: $r = 0,24; b = 1,2; c = 1,4$. Положення шатунної точки розраховано числовим способом та визначається довжиною другого плеча шатуна $k = l_{BD} = 1,09069068952907$ та кутом його злому $\Omega = 125,26402568421$. Особлива точка (шестикратний вузол інтерполяції) розрахований для положення шатунної площини визначається положенням кривошипа $\varphi_1 = 188,628168465133^\circ$. За наведеними параметрами механізму, результати проведених розрахунків за формулами (15), (28) та (47) показані на рис. 2. Розрахунки проведені у системі *Mathcad*.

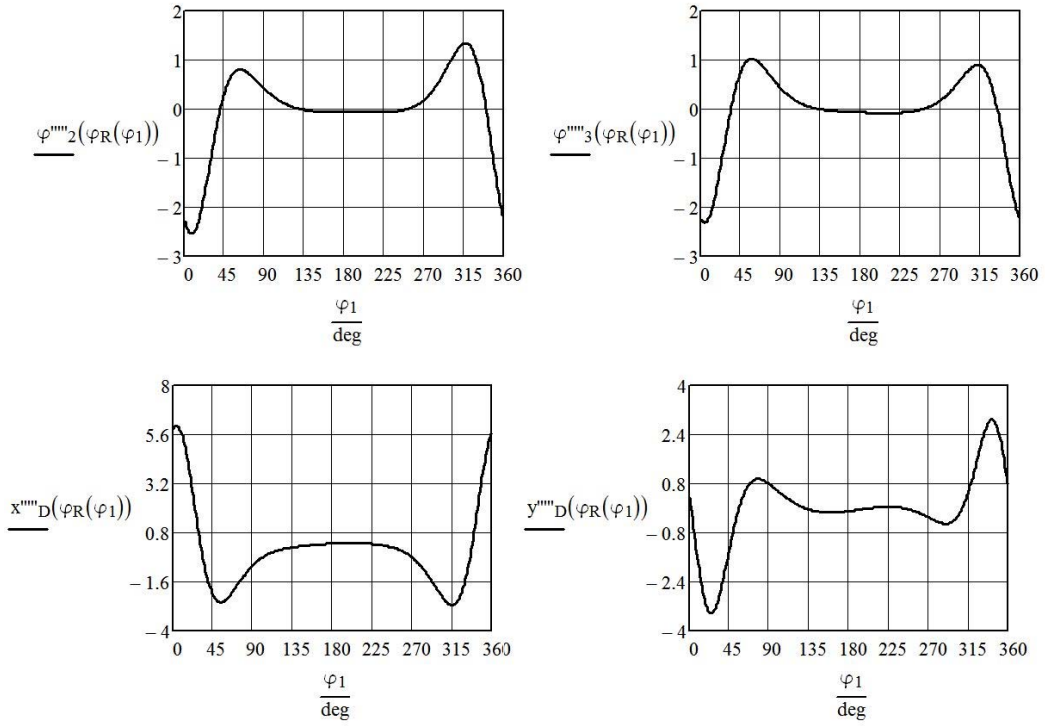


Рис. 2. Приклади результатів проведених розрахунків: $\varphi_2^V, \varphi_3^V, x_D^V$ **та** y_D^V.

В процесі виведення формул (5)–(47), з метою отримання більш компактних результатів використовувались відомі формули для перетворення тригонометричних виразів. Тому, при проведенні розрахунків за цими формулами передбачено виключення з розрахунку точок, що відповідають положенням кривошипа, що кратні $\pi/2$ (оскільки розраховані значення внаслідок проведених тригонометричних перетворень прямують до нескінченності), замість них приймались середні значення сусідніх положень. Оскільки розрахунки проводились з досить малим кроком $\varphi_1 = 0{,}1^\circ$ (для 3600 положень механізмів), така заміна є досить рівноцінною. Для цього, в якості параметра функцій замість кута повороту кривошипа φ_1 вводиться значення φ_R, що враховує зазначені вище особливості. У системі *Mathcad*, це реалізовано наступною функцією:

$$\varphi R(\varphi 1) := \begin{cases} \varphi 1 + \dfrac{2\cdot\pi}{N} & \text{if } \varphi 1 = \dfrac{\pi}{2} \vee \varphi 1 = \dfrac{3\pi}{2} \vee \varphi 1 = \pi \vee \varphi 1 = 0 \\ \varphi 1 - \dfrac{2\cdot\pi}{N} & \text{if } \varphi 1 = 2\cdot\pi \\ \varphi 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Використовуючи наведені вище формули (5)–(47), а також формули для розрахунку перших чотирьох похідних величин, що наведені у [4], можна визначити наявність дотику 5-го порядку шляхом розрахунку значень N_3, N_4, N_5 за формулами (2)-(4), з метою перевірки одночасної рівності нулю цих величин в даній точці шатунної кривої. Для прикладу, що розглядався вище, отримані результати наведені на рис. 3.

Як видно з наведеного графіка, у точці, яка відповідає куту повороту кривошипа φ_1, що визначає положення шатунної площини механізму, спостерігається виконання умови наявності дотику 5-го порядку: $N_3 = N_4 = N_5 = 0$ (за результатами проведених розрахунків – 10^{-17}). Це означає, що шатунна точка *D* для даного положення шатунної площини є шестикратним вузлом інтерполяції, в якому спостерігається рівність не тільки значень заданої та замінювальної функцій (шатунної кривої та кола наближення), але й їх п'яти їх перших похідних (див. рис. 1). Використання таких точок для проведення синтезу забезпечує математично найвищий порядок дотику кривих для шарнірного чотириланкового механізму та відповідно дозволяє проектувати на їх основі механізми із тривалими ділянками наближення високої точності.

Таким чином, в результаті проведених досліджень, для несиметричного шарнірного чотириланкового механізму розроблено метод, що дозволяє при проведенні синтезу кругових напрямних механізмів проводити перевірку наявності дотику найвищого 5-го порядку шатунної кривої в даній точці з її колом кривизни.

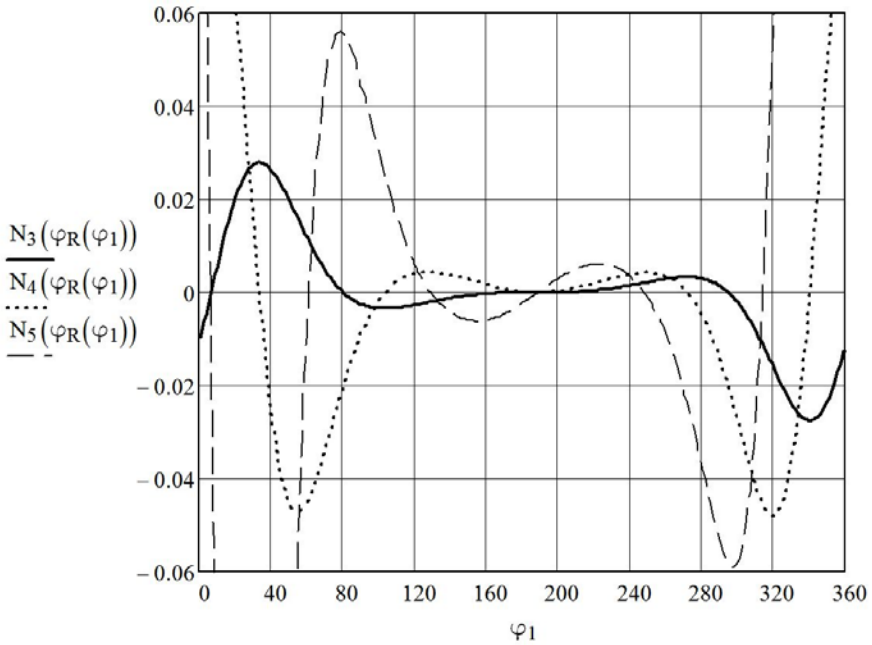


Рис. 3. Перевірка умови наявності дотику 5-го порядку на прикладі механізму, синтезованого для φ_1=188,628°: N_3= N_4= N_5=0.

Дослідження планується продовжити в напрямку розробки методу оптимізаційного синтезу таких механізмів та побудовою меж їх існування.

Література

1. Артоболевский И. И. Синтез плоских механизмов / И. И. Артоболевский, Н. И. Левитский, С. А. Черкудинов. – М. : Физматгиз, 1959. – 1084 с.

2. Киницкий Я.Т. Шарнирные механизмы Чебышева с выстоем выходного звена / Я. Т. Киницкий. – К. : Вища школа, 1990. – 232 с.

3. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин в системі Mathcad : навч. посібник / Я.Т. Кіницький, В.О. Харжевський, М.В. Марченко. – Хмельницький : ХНУ, 2014. – 295 с.

4. Харжевський В.О. Методика визначення особливих точок Чебишева для синтезу важільних прямолінійно-напрямних механізмів / В.О. Харжевський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 3. – С. 34–41.

5. Gassmann V. Synthese von Geradführungen mit ebenen Viergelenkgetrieben, Hamburg, Universität der Bundeswehr Diss., 2000. 102 p.

6. J. McCarthy, G. Soh, Geometric Design of Linkages, 2nd edition, Springer-Verlag, New York, 2011– 448 p.

7. Sarkissyan Y.L. Approximations in Synthesis of Mechanisms. State Engineering University of Armenia Proceedings, series “Mechanics, Machine Science, Machine-building”, Issue 15, №2, 2012, pp. 9–21.

8. L. Yin, J. Han, J. Huang, T. Yang, "A General Method for Synthesizing Straight-Line Linkage with Ball and Burmester Points", Applied Mechanics and Materials, Vols 215-216, 2012, pp. 138–141.

9. Wang D., Wang W., Kinematic Differential Geometry and Saddle Synthesis of Linkages. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. 450 p.

Рецензія/Peer review : 9.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кіницький Я.Т.

УДК 677.055

Г.М. ДРАПАК
Хмельницький національний університет

ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ МАШИН

Ефективність роботи машин, зокрема машин і апаратів легкої промисловості, суттєво залежить від динамічних навантажень, зумовлених їх пуском. З метою зниження пускових динамічних навантажень машин, як показує аналіз, найбільш доцільним є зниження пускового моменту електродвигуна. Реалізацією цього рішення є використання в складі привода машини або апарата відцентрової фрикційної муфти. При цьому, оскільки ряд машин легкої промисловості, зокрема в'язальні, працюють в двошвидкісному режимі, доцільно використовувати в їх приводі відцентрову фрикційну муфту з постійним моментом. Для розробки таких муфт необхідно мати інженерний метод оцінки ефективності їх використання для зниження пускових динамічних навантажень та вибору раціональних параметрів відцентрової фрикційної муфти з постійним моментом. Встановлено, що використання в приводі машин і апаратів легкої промисловості відцентрової фрикційної муфти дозволяє знизити динамічні навантаження, що виникають під час пуску, в 2,73 разу. Результати досліджень можуть бути використані в ході розробки нових моделей машин і апаратів легкої промисловості.

Ключові слова: машини і апарати легкої промисловості, привід машин, динамічні навантаження машин, відцентрова фрикційна муфта постійного моменту.

G.M. DRAPAK
Khmelnytsky National University

REDUCTION DYNAMIC LOADING MACHINES

The efficiency of vehicles, including cars and light industrial vehicles essentially depends on the dynamic loads due to their launch. To reduce the dynamic loads launch vehicles, analysis shows that the most expedient is to reduce the starting torque of the motor. Implementation of this solution is the use in machines or apparatus drive centrifugal friction clutches. However, since a number of light industrial machinery, including knitting, working in two-speed mode should be used in their drive centrifugal friction coupling constant moment. To develop these joints should have an engineering method for assessing the effectiveness of their use to reduce launch loads and dynamic choice of rational parameters of centrifugal friction coupling constant moment. It was established that the use of machines and devices drive light industrial centrifugal friction clutches can reduce the dynamic loads that occur during start-up in 2,73 times. The research results can be used to develop new models of cars and light industrial vehicles.

Keywords: cars and light industrial vehicles, drive cars, dynamic loading machines, centrifugal friction coupling constant moment.

Перспективним напрямком підвищення ефективності роботи машин, є зниження динамічних навантажень, що виникають під час пуску. Дослідження [1, 2] показують, що динамічні навантаження суттєво впливають як на довговічність роботи механічних систем, так і на якість продукції, що випускається [3]. Тому проблема зниження динамічних навантажень машин є однією із актуальних проблем легкого машинобудування. Для розв'язання цієї проблеми важливим є аналіз впливу параметрів машин і апаратів на динамічні навантаження, що виникають під час пуску, та розробка конструкцій пристроїв для їх зниження.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень обрано динамічні навантаження машин і апаратів легкої промисловості, що виникають під час пуску, та методи їх зниження. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи теорії динаміки механічних систем з пружними в'язями та теорії проектування машин і апаратів легкої промисловості.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання підвищення ефективності роботи машин і апаратів легкої промисловості (підвищення продуктивності та якості виробів), стаття присвячена аналізу динаміки машин – динамічних навантажень, що виникають в приводі під час пуску, та аналізу ефективності використання відцентрових фрикційних муфт для їх зниження.

Результати та їх обговорення

З метою оцінки величини динамічних навантажень, що виникають від час пуску машин, їх реальну конструкцію, як показують дослідження [1, 2], доцільно замінити двомасовою динамічною моделлю з параметрами: T_1 – пусковий момент електродвигуна; T_2 – статичний момент привода; J_1 – момент інерції ротора електродвигуна з урахуванням моменту інерції муфти [4]; J_2 – сумарний момент інерції обертальних мас механізмів машини; C_{12} – жорсткість в'язі, що з'єднує електродвигун з механізмами машини.

При виборі параметрів динамічної моделі машини слід враховувати рекомендації монографії [2], присвячені дослідженням динамічних процесів в механічних системах з пружними в'язями. При цьому реальні параметри машини слід приводити до одного із валів привода, зазвичай до валу електродвигуна.

Як відомо [1, 2, 5] пуск двомасової механічної системи відбувається в два етапи. Перший етап пуску характеризується рухом першої маси системи, який продовжується від 0 до τ_1, поки момент в пружній в'язі C_{12} не досягне величини T_2. При цьому починається другий, остаточний етап пуску, який характеризується рухом обох мас системи і продовжується від τ_1 до часу пуску машини t_n.

Рівняння руху обертальних мас системи для першого етапу пуску мають вид:

$$J_1\ddot{\phi}_1 + C_{12}\phi_1 = T_1, \tag{1}$$

де φ_1 – кут повороту ведучої маси.

Розв'язок диференційного рівняння (1) можемо представити у вигляді [2]:

$$T_{12} = A_{12}\cos\beta\cdot t + B_{12}\sin\beta\cdot t + a_{12}, \tag{2}$$

де T_{12} – момент пружних сил, що виникає у в'язі C_{12}:

$$T_{12} = C_{12}\phi_1; \tag{3}$$

A, B – постійні диференціювання;

β – циклова частота коливань маси J_1 системи:

$$\beta = \sqrt{C_{12}/J_1}; \tag{4}$$

a_{12} – постійна складова моменту T_{12}, згідно з [2]:

$$a_{12} = T_1. \tag{5}$$

Враховуючи початкові умови першого етапу пуску системи $T_{(12)0} = 0;\ \dot{T}_{(12)0} = 0,$ знаходимо:

$$A_{12} = -T_1;\quad B_{12} = 0. \tag{6}$$

Підставивши (5), (6) в (2), маємо:

$$T_{12} = T_1\left(1 - \cos\beta\cdot t\right). \tag{7}$$

З рівняння (7) знаходимо тривалість першого етапу пуску системи (початок другого етапу пуску) τ_1, враховуючи, що другий етап пуску розпочинається при умові $T_{12} = T_2$:

$$\tau_1 = \frac{1}{\beta}\arccos\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right). \tag{8}$$

Другий етап пуску починається при початкових умовах ($t = 0$):

$$T_{(12)0} = T_2;\ \dot{T}_{(12)0} = T_1\beta\cdot\sin\beta\cdot\tau_1. \tag{9}$$

Рівняння руху мас системи під час другого етапу пуску мають вид [2]:

$$J_1\ddot{\phi}_1 = T - T_{12};\ J_2\ddot{\phi}_2 = T_{12} - T_2. \tag{10}$$

Підставивши $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$, знайдені із (10), в рівняння $\ddot{T}_{12} = C_{12}\left(\ddot{\phi}_1 - \ddot{\phi}_2\right),$ знаходимо:

$$\ddot{T}_{12} = \frac{C_{12}}{J_2}\left[T_1\frac{J_2}{J_1} + T_2 - \left(1 + \frac{J_2}{J_1}\right)T_{12}\right]. \tag{11}$$

Розв'язок диференційного рівняння (11) можемо представити у вигляді, наведеному раніше. Для другого етапу пуску машини параметри рівняння (2) знаходяться, враховуючи початкові умови та рекомендації [2], наступним чином:

$$A_{12} = T_2 - T_1;\ B_{12} = \frac{\dot{T}_{(12)0}}{\beta_1};\ a = \frac{T_1J_2 + T_2J_1}{J_1 + J_2};\ \beta_1 = \sqrt{\frac{C_{12}\left(J_1 + J_2\right)}{2J_1J_2}}. \tag{12}$$

Тоді, аналізуючи рівняння (2) та враховуючи рекомендації щодо складання коливань моментів сил пружності однакової частоти [5], приходимо до висновку, що максимальна величина моменту T_{12} буде дорівнювати:

$$T_{12\max} = D + a = \sqrt{A_{12}^2 + B_{12}^2} + a, \tag{13}$$

де D – сумарна амплітуда коливань моментів сил пружності.

Підставивши одержані результати (12) в рівняння (13), знаходимо:

$$T_{12\max} = \sqrt{\left(T_2 - T_1\right)^2 + \left[\frac{T_1\sqrt{\frac{C_{12}}{J_1}}\sin\left\{\sqrt{\frac{C_{12}}{J_1}}\cdot\sqrt{\frac{J_1}{C_{12}}}\arccos\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)\right\}}{\sqrt{\frac{C_{12}\left(J_1 + J_2\right)}{J_1J_2}}}\right]^2} + \frac{J_2T_1 + J_1T_2}{J_1 + J_2}. \tag{14}$$

Після перетворень вираз (14) остаточно приймає вигляд:

$$T_{12\max} = \sqrt{\left(T_2 - T_1\right)^2 + \frac{T_1^2J_2\sin^2\left[\arccos\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)\right]}{J_1 + J_2}} + \frac{J_2T_1 + J_1T_2}{J_1 + J_2}. \tag{15}$$

Як показує аналіз залежності (15), найбільш доцільним для зниження динамічних навантажень, що

виникають під час пуску, є зниження пускового моменту електродвигуна T_1. Так, наприклад, для в'язальної машини КО-2 з параметрами [5]: $T_1 = 48,6$ Нм; $T_2 = 22,1$ Нм; $J_1 = 0,023$ кгм^2; $J_2 = 0,062$ кгм^2; $C_{12} = 1940$ Нм/рад при максимально можливій величині пускового моменту електродвигуна $T_1 = 48,6$ Нм згідно з (15) $T_{12\max} = 80,5$ Нм; при можливому зниженні пускового моменту до $T_1' = 1,1T_2 = 1,1 \cdot 22,1 = 24,31$ Нм максимальне динамічне навантаження приводу машини становить всього $T_{12\max}' = 29,5$ Нм.

Таким чином існує можливість знизити динамічні навантаження машини КО-2 в $n = \frac{T_{12\max}}{T_{12\max}'} = \frac{80,5}{29,5} = 2,73$ разу.

З метою реалізації зниження динамічних навантажень, що виникають під час пуску машини, пропонується обладнати її привід фрикційною муфтою [5]. При цьому, оскільки ряд машин легкої промисловості, зокрема в'язальні, працюють в двошвидкісному режимі, доцільно використовувати в їх приводі відцентрову фрикційну муфту постійного моменту. На рис. 1 представлена схема привода рукавичного автомата, як приклад, з відцентровою фрикційною муфтою постійного моменту.

Обладнання привода в'язальної машини або автомата відцентровою фрикційною муфтою постійного моменту, встановленою в ведучий шків, дозволяє здійснювати пуск при обмеженому пусковому моменту електродвигуна при обох швидкісних режимах його роботи, що призводить до зниження динамічних навантажень в механічній системі і, як наслідок, до підвищення надійності та довговічності роботи привода і рукавичного автомата в цілому.

Привід містить електродвигун 1, відцентрову фрикційну муфту постійного моменту 2, встановлену на валу електродвигуна та вмонтовану в ведучий шків 3 клинопасової передачі 4, що кінематично з'єднує електродвигун з механізмами рукавичного автомата.

Відцентрова муфта містить хрестовину 5, жорстко закріплену на валу електродвигуна 1, колодки 6, встановлені в хрестовині 5 з можливістю радіального переміщення, штифти 7, жорстко закріплені в кришці 8 відцентрової фрикційної муфти 2, що обмежують радіальне переміщення колодок 6. Кожна з колодок 6 має рухому накладку 9, що утворює поверхню тертя з ведучим шківом 3. Накладка 9 з'єднана з колодкою 6 рухомо за допомогою відгинів 10, розміщених в пазах 11 колодки 6. Між накладкою 9 та колодкою 6 встановлено по дві пружини стиску 12.

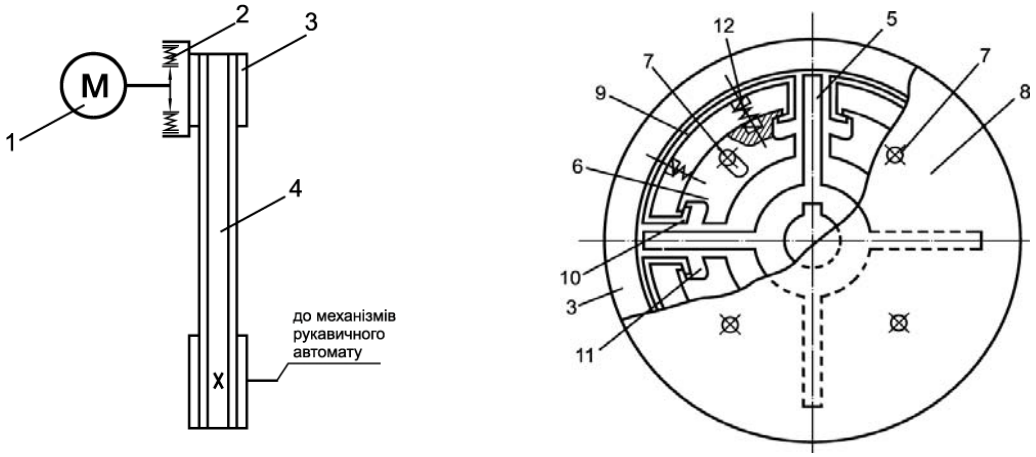


Рис. 1. Схема привода рукавичного автомата з відцентровою муфтою постійного моменту

Принцип роботи привода полягає в наступному. При вмиканні електродвигуна 1 на малу швидкість хрестовина 5 починає обертатися. Відцентрові сили, що виникають при цьому, змушують кожну з колодок 6 переміститися в радіальному напрямі до упора її у штифт 7. Переміщення колодки 6 зумовлює стискання пружин 12. Сила пружності пружин 12, що виникає при цьому, притискує накладку 9 до ведучого шківа 3. Сила тертя, зумовлена притисканням накладок 9 до ведучого шківа 3, утворює момент тертя, необхідний для передачі обертального руху електродвигуна 1 за допомогою клинопасової передачі 4 механізмам рукавичного автомата. При перемиканні електродвигуна на більшу швидкість величина відцентрової сили кожної з колодок 6 збільшується. Однак оскільки радіальне переміщення колодок 6 обмежено штифтами 7, вони зі збільшенням швидкості електродвигуна залишаються нерухомими. Як і в режимі малої швидкості, момент сил тертя відцентрової фрикційної муфти, що утворюється силами тертя в зоні притискання накладок 9 до ведучого шківа 3, залежить лише від зусилля пружин, яке, оскільки величина їх стискання залишається постійною, залишається також постійним. Таким чином, незважаючи на зміни швидкості електродвигуна, відцентрова муфта забезпечує сталість моменту, що передається механізмам рукавичного автомата, незалежно від зміни швидкості електродвигуна. Пуск автомата відбувається при обмеженому

пусковому моменту електродвигуна (моменту відцентрової фрикційної муфти) при обох швидкісних режимах його роботи, що призводить до зниження динамічних навантажень в приводі.

Висновки

Аналізуючи результати досліджень, можемо зробити наступні висновки:

- запропонований метод динамічного аналізу привода машин, зокрема машин і апаратів легкої промисловості, дозволяє оперативно вирішувати питання знаходження динамічних навантажень, що виникають в приводі під час пуску;
- з метою зниження пускових динамічних навантажень машин, як показує аналіз, найбільш доцільним є зниження пускового моменту електродвигуна;
- зниження пускового моменту електродвигуна може бути досягнуто шляхом використання в складі привода машини відцентрової фрикційної муфти;
- встановлено, що використання в приводі в'язальних машин типу КО відцентрової фрикційної муфти дозволяє знизити динамічні навантаження, що виникають під час пуску, в 2,73 разу.

Література

1. Голубенцев А.Н. Динамика переходных процессов в машинах со многими массами / Голубенцев А.Н. – М. : Машгиз, 1959. – 306 с.

2. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах / Кожевников С.Н. – К. : Наукова думка, 1986. – 288 с.

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

4. Поляков В.С. Справочник по муфтам / Поляков В.С., Барабаш И.Д., Ряховский О.А. – 2-е изд. – Л. : Машиностроение, 1979. – 351 с.

5. Піпа Б.Ф. Приводи в'язальних машин і автоматів з пристроями зниження динамічних навантажень / Піпа Б.Ф., Чабан О.В., Музичишин С.В. – К. : КНУТД, 2015. – 280 с.

Рецензія/Peer review : 11.11.2015 р. Надрукована/Printed :4.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Сорокатий Р.В.

УДК 681.5.015.63:539.4.019:621.319.4

А.В. ГОРОШКО
Хмельницький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ УСІЧЕНОЇ ОЦІНКИ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ ПІД ЧАС РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТІВ РОТОРА

Показана актуальність проблеми ідентифікації ексцентриситетів для ротора авіадвигуна. Запропоновано використання методу головних компонент для усіченої оцінки найменших квадратів в розв'язанні некоректно поставленої оберненої задачі ідентифікації ексцентриситетів за експериментально визначеними прогинами ротора і статичними коефіцієнтами впливу. Продемонстрована ефективність методу усічених оцінок в задачі визначення ексцентриситетів ротора компресора авіадвигуна АИ-20 для п'ятимасової моделі в порівнянні з методом найменших квадратів.

Ключові слова: метод головних компонент,усічена оцінка, авіадвигун АИ-20, ексцентриситети, обернена задача, метод найменших квадратів

ANDRII VOLODYMYROVYCH GOROSHKO
Khmelnytsky National University

APPLICATION OF PRINCIPAL COMPONENT FOR TRUNCATED EVALUATION LEAST SQUARES TO SOLVE THE INVERSE PROBLEM IDENTIFICATION ROTOR ECCENTRICITY

Abstract - Shown relevance of identifying eccentricities for rotor aircraft engine. The use of the method of principal component truncated least squares estimation in solving ill-posed inverse problem for identification eccentricities experimentally determined deflections of the rotor and static factors of influence. The effectiveness of the method of truncated ratings the problem of determining eccentricities compressor rotor aircraft engine AI-20 for 5-mass model compared with the method of least squares.

Keywords: principal components method, truncated assessment, aircraft engine AI-20, eccentricities, inverse problem, method of least squares.

Вступ

Газотурбінні двигуни (ГТД) є відповідальними конструкціями, що застосовуються в авіації (рис. 1). Досвід їх проектування, виробництва і експлуатації виявив цілу низку проблем міцності і надійності цих конструкцій, зокрема перевищення ротором допустимих за ТУ вібрацій.

Ротор компресора газотурбінного двигуна (ГТД) АИ-20 дисково-барабанного типу містить десять

окремих дисків, які несуть на своїх вінцях робочі лопатки, задній вал ротора і лабіринти ущільнення вузлів заднього і переднього підшипника (рис. 2).

Крутний момент турбіни сприймається шліцами заднього валу і від диску до диску передається радіальним штифтам, розташованим в пазах під лопатками. Диски компресора сполучаються один з одним напресуванням по посадковим поясам із заданим натягом. Всі диски і задній вал компресора після механічної обробки піддаються статичному балансуванню в динамічному режимі, а зібраний ротор компресора – динамічному балансуванню до залишкового дисбалансу 5 г·см на кожну опору. При складанні машини передній підшипник ротора монтується у лобовому картері, а задній – у корпусі камери згорання. Цими вузлами і визначається носкість опор ротора.

Ротор компресора дисково-барабанного типу містить десять окремих дисків, які несуть на своїх вінцях робочі лопатки, задній вал ротора і лабіринти ущільнення вузлів заднього і переднього підшипника (рис. 2). Всі диски і задній вал компресора після механічної обробки піддаються статичному балансуванню в динамічному режимі, а зібраний ротор компресора – динамічному балансуванню до залишкового дисбалансу 5 г·см на кожну опору.

В процесі експлуатації двигунів АИ-20 і при проведенні тривалих випробувань на стендах були знайдені такі дефекти, як погнутість заднього вала, поломки штифтового з'єднання ротора компресора, головним чином, у зчленуванні заднього вала з десятим ступенем ротора, а також низка дефектів по корпусу камери згорання. Причинами дефектів були вібрації двигуна.

Постановка проблеми

Для зменшення вібрацій двигуна необхідно знати ексцентриситети вала. Одним із способів їх ідентифікації є розв'язання базі експериментальних даних матричного рівняння

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\left(\mathbf{Y} + \mathbf{e}\right)\omega^2, \tag{1}$$

де $\mathbf{Y} = \left[y_i\right]_{1\times n}$, $\mathbf{e} = \left[e_i\right]_{1\times n}$, $\mathbf{A} = \left[a_{ik}\right]_1^n$. Тут координатами вектора $\mathbf{Y}$ є прогини вала ротора в місцях посадки дисків, вектора $\mathbf{e}$ – ексцентриситети цих дисків, а елементи матриці $\mathbf{A}$ являють собою добуток статичних коефіцієнтів впливу на маси відповідних дисків.

Перетворимо (1) до вигляду

$$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{A}\omega^2}{1 - \mathbf{A}\omega^2}\mathbf{e}. \tag{2}$$

Поклавши $\widehat{\mathbf{A}} = \frac{\mathbf{A}\omega^2}{1 - \mathbf{A}\omega^2}$, приходимо до розв'язання лінійної некоректно-поставленої оберненої задачі типу

$$\mathbf{Y} = \widehat{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{e}. \tag{3}$$

Внаслідок того, що обумовленість $cond\left(\widehat{\mathbf{A}}\right)$ як правило велика, а елементи вектора $\mathbf{Y}$ вимірюються з похибками, задача ідентифікації ексцентриситетів ротора типу (1) не може бути розв'язана на практиці, оскільки її розв'язки будуть хибними. Отже, актуальною проблемою на шляху розв'язання вказаної оберненої задачі є подолання нестійкості її розв'язків, викликаною поганою обумовленістю матриці $\widehat{\mathbf{A}}$. Задача буде некоректною і її розв'язок нестійким з тієї причини, що маленькі похибки в $\mathbf{Y}$ будуть набагато збільшені у розв'язку $\mathbf{X}$ [1, 2].

В роботах [3, 4] показано, що для забезпечення стійкості розв'язків необхідно застосовувати багатократні вимірювання, що є по суті застосуванням методу найменших квадратів (МНК). Збільшуючи кількість вимірювань, можна зменшити похибку вимірювань (рис. 3). Але на практиці безмежно підвищувати таким способом точність вимірювання не вдається, оскільки рано чи пізно визначальним стає не розсіювання середнього арифметичного, а брак інформації (що виражається, наприклад, у незнанні точного значення поправок і т. п.). Накопичувати експериментальні дані і зменшувати за рахунок цього стандартне відхилення середнього арифметичного має сенс лише до тих пір, поки за умовою ним не можна знехтувати у порівнянні з аналогом середнього квадратичного відхилення, яке враховує дефіцит інформації. Точність багаторазового вимірювання, отже, обмежується дефіцитом інформації, що і викликає систематичну похибку.

Отже, незважаючи на те, що оцінка найменших квадратів (ОНК) – незміщена оцінка, вона є нестійкою, і для системи лінійних алгебраїчних рівнянь з великими числами обумовленості МНК малоефективний. Причиною нестійкості є величезна дисперсія ОНК. Як зазначають автори [5], при розв'язані оберненої задачі функція правдоподібності має застосовуватись лише як попередній інструмент. Замість цього слід опиратись на деяку не комунікативну статистику, яка б брала до уваги систематичні відхилення порівнюваних випадкових послідовностей.

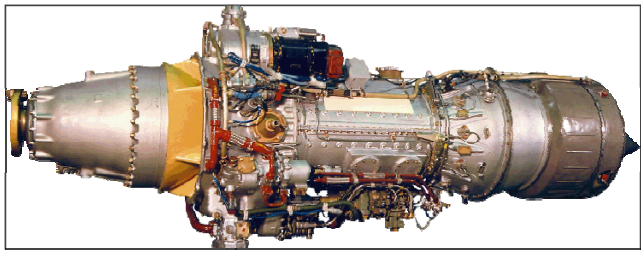


Рис. 1. Газотурбінний авіаційний двигун АИ-20

Рис. 2. Зовнішній вигляд ротора компресора газотурбінного двигуна АИ-20

Опис теоретичних досліджень

Для розв'язання оберненої задачі визначення ексцентриситетів ротора пропонується застосувати до ОНК лінійну фільтрацію. Суть фільтрації, як одного із методів регуляризації, полягає у тому, щоб свідомо піти на деяке зміщення отриманої оцінки, при цьому істотно зменшивши її розсіяння. Отже, необхідно знайти таку оцінку, зміщення якої ще прийнятне, а дисперсія – значно менша, ніж у ОНК. З метою фільтрації пропонується застосувати стиснення інформації і одержання усіченої оцінки (*truncated estimate*). Для цього пропонується використати відомий із статистики і багатомірного аналізу метод стиснення даних – метод головних компонент (*PCA*) [5].

Нехай замість (3) розв'язується

$$\mathbf{AX} = \mathbf{Y} + \Delta\mathbf{Y}, \tag{4}$$

де $\mathbf{Y}$ – істинне значення, $\Delta\mathbf{Y}$ – вектор значень «шуму», компоненти якого розподілені нормально $\Delta y_i \square N(0,\sigma_i)$. Тоді $\Delta\mathbf{Y}$ є багатомірною нормальною величиною з нульовим середнім $\langle\Delta\mathbf{Y}\rangle = 0$ і коваріаційною матрицею $\mathbf{\Sigma} = \mathrm{cov}(\Delta\mathbf{Y})$.

Як відомо, одну із важливіших ролей у аналізі формування нестійкості розв'язків лінійних обернених задач відіграє матриця Фішера $\mathbf{I}$, оскільки дорівнює оберненій коваріаційній матриці ОНК $\mathbf{\Omega} = \mathbf{I}^{-1}$. Матриця Фішера для ОНК оцінки моделі (4) може бути знайдена за формулою

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}^T \mathbf{\Sigma}^{-1} \mathbf{A},$$

де коваріаційна матриця «шуму» знаходиться як $\mathbf{\Sigma} = \left(\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}}\right)^T \left(\mathbf{Y} - \bar{\mathbf{Y}}\right)$, або за формулою

$$\mathbf{I} = \left(\left(\mathbf{X} - \widehat{\mathbf{X}}\right)^T \left(\mathbf{X} - \widehat{\mathbf{X}}\right)\right)^{-1},$$

де $\widehat{\mathbf{X}}$ – ОНК.

Отримаємо спектральне представлення інформаційної матриці Фішера у вигляді

$$\mathbf{I} = \mathbf{VDV}^T, \ \mathbf{D} = diag\left(\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n\right), \ \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq ... \lambda_n > 0, \tag{5}$$

де $\left(\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n\right)$ – власні значення матриці Фішера, $\mathbf{V}$ – ортогональна матриця, стовпці якої $\left(\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, ..., \mathbf{V}_n\right)$ задають напрями головних осей еліпсоїдальної області допустимих оцінок некоректно поставленої задачі (1) [5]. В той час ОНК розкладається за системою власних векторів матриці Фішера як

$$\widehat{\mathbf{X}} = \mathbf{V}\widehat{\mathbf{p}}, \tag{6}$$

де $\widehat{p}_1, \widehat{p}_2, ..., \widehat{p}_n$ – головні компоненти ОНК. Це компоненти $\widehat{\mathbf{X}}$ в системі координат, яка повернута відносно початкової таким чином, щоб координатні вісі стали паралельні головним осям еліпсоїда розсіяння ОНК.

Як відомо [5], слід коваріаційної матриці ОНК дорівнює сумі її власних значень

$$tr(\mathbf{\Omega}) = \sum_{i=1}^{n} \left\langle \left(\widehat{x}_i - x_i\right)^2 \right\rangle = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^{-1}.$$

Звідси видно, що сумарне відхилення ОНК від істинного об'єкта визначається спектром матриці $\mathbf{I}$. Найбільший внесок у сумарне відхилення вносять найменші власні значення, тобто «хвіст» матриці Фішера. Отже, суть фільтрації полягає у компромісному виборі такої кількості головних компонент $\nu \leq n$, яка б забезпечила достатню точність оцінки при прийнятній дисперсії. Збільшуючи ν, ми досягаємо більш точного в середньому представлення $\mathbf{X}$ через $\widehat{\mathbf{X}}_\nu$, але при цьому враховується все більше доданків λ_k^{-1} із «хвоста» спектра матриці Фішера, і це дуже швидко погіршує якість усіченої оцінки.

Усічена оцінка має вигляд

$$\mathbf{X}_{tr} = \mathbf{V}_{\nu_{\min}} \widehat{\mathbf{p}}.$$

Враховуючи, що із (6) $\widehat{\mathbf{p}} = \mathbf{V}^T \widehat{\mathbf{X}}$, маємо

$$\mathbf{X}_{tr} = \mathbf{V}_{\nu_{\min}} \mathbf{V}^T \widehat{\mathbf{X}}. \tag{7}$$

Застосування методу для розв'язання оберненої задачі ідентифікації ексцентриситетів ротора

Запропоновані статистичні методи ОНК і усіченої оцінки були застосовані для розв'язання оберненої задачі визначення невідомих ексцентриситетів ротора компресора авіаційного газотурбінного двигуна АИ-20.

Розглянемо застосування ОНК і усіченої оцінки для розв'язання оберненої задачі визначення невідомих ексцентриситетів ротора за допомогою коефіцієнтів впливу шляхом розв'язання матричного рівняння (1).

Для пошуку ексцентриситетів була створена п'ятимасова математична модель ротора компресора, представлена на рис. 4.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.228 & 0.203 & 0.195 & 0.155 & 0.1299 \\ 0.184 & 0.246 & 0.284 & 0.246 & 0.2457 \\ 0.143 & 0.230 & 0.303 & 0.295 & 0.3472 \\ 0.111 & 0.195 & 0.290 & 0.336 & 0.4440 \\ 0.067 & 0.139 & 0.234 & 0.316 & 0.5200 \end{bmatrix}, \; c^{-2}.$$

Критичні частоти обертання ротора на жорстких опорах дорівнюють 14000, 28900, 65300, 130600, 419300 об/хв. Число обумовленості матриці $cond(\mathbf{A}) \approx 573$. Це означає, що при точності вимірювання прогинів ротора 10^{-5} м, що відповідає відносній похибці 6–10%, похибка у визначенні ексцентриситетів для звичайного інверсного розв'язку $\mathbf{e} = \widehat{\mathbf{A}}^{-1}\mathbf{Y}$ системи (3) може сягнути 5730%, тобто отриманий розв'язок буде абсолютно ненадійним. Застосування ОНК в цій ситуації при 50-и вимірюваннях покращить точність ненабагато (оцінка зверху зменшиться приблизно в 7 разів), що теж не є прийнятним.

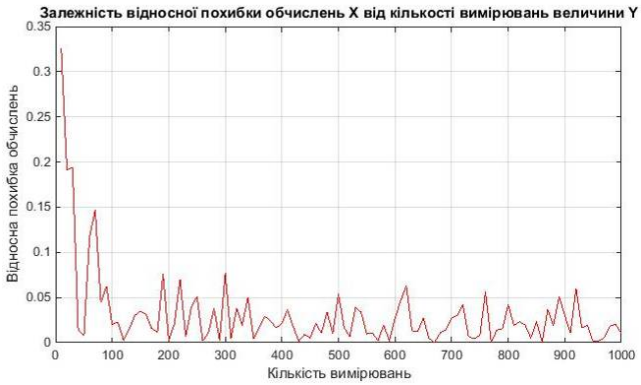


Рис. 3. Залежність відносної похибки обчислень $\mathbf{X}$ від кількості вимірювань $\mathbf{Y}$

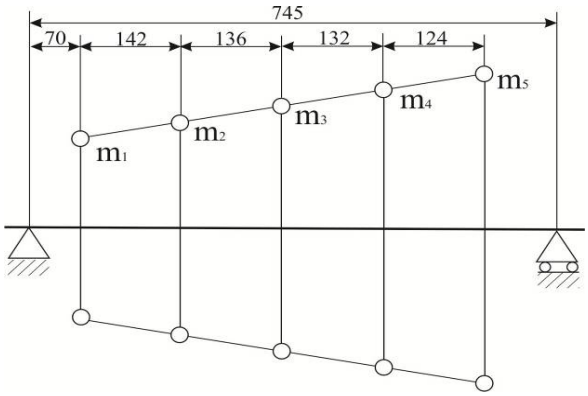


Рис. 4. П'ятимасова модель ротора компресора

Для перевірки дієвості запропонованого методу лінійної фільтрації з використанням методу головних компонент за допомогою програми MATLAB [6] був проведений наступний чисельний експеримент. На основі заданих точних значень ексцентриситетів перерізів $\mathbf{e} = \left[77.4,\ 89.9,\ 105.0,\ 79.0,\ 59.5\right]^T \cdot 10^{-6}$ м. були визначені точні значення прогинів $\mathbf{Y}$ ротора шляхом розв'язку прямої задачі, в якому матриця $\mathbf{A}$ передбачалась заданою без похибок. Ці значення $\mathbf{Y}$ =[76.35, 100.23, 107.52, 109.53, 98.16]$^T \cdot 10^{-6}$ м. були прийняті за математичне сподівання прогинів у заданих перерізах. Далі, задаючи СКВ $\sigma = \Delta/3$, де $\Delta = 10^{-5}$ м. – точність вимірювань, використовуючи комп'ютерний генератор випадкових чисел, були отримані різні реалізації прогинів, як випадкових величин, розподілених за нормальним законом розподілу із вказаними вище параметрами. У наведеному експерименті було передбачено генерування 50 реалізацій прогинів у кожному із розглянутих перерізів. Для кожної реалізації $\mathbf{Y}$ були знайдені реалізації $\mathbf{e}$ і за ними – їх математичні сподівання, що співпадають із ОНК $\widehat{\mathbf{e}}$.

Матриця Фішера дорівнює

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0.3273 & 0.4145 & 0.5008 & 0.4771 & 0.5375 \\ 0.4145 & 0.5629 & 0.7082 & 0.7002 & 0.8257 \\ 0.5008 & 0.7082 & 0.9137 & 0.9263 & 1.1251 \\ 0.4771 & 0.7002 & 0.9263 & 0.9651 & 1.2090 \\ 0.5375 & 0.8257 & 1.1251 & 1.2090 & 1.5683 \end{bmatrix} \times 10^9.$$

Здійснивши спектральне розкладання матриці Фішера згідно (5), одержали діагональну матрицю $\mathbf{D}$ з власними значеннями на головній діагоналі (вибірковими дисперсіями головних компонент) і матрицю власних векторів $\mathbf{V}$.

$$\mathbf{D}=\begin{bmatrix} 64215 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 14310 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2919 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 568 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 104 \end{bmatrix},\ \mathbf{V}=\begin{bmatrix} -0.2463 & 0.5968 & 0.7071 & -0.2176 & 0.1891 \\ -0.3559 & 0.4432 & -0.1751 & 0.5095 & -0.6218 \\ -0.4670 & 0.2426 & -0.5148 & 0.1023 & 0.6690 \\ -0.4831 & -0.1000 & -0.2230 & -0.7616 & -0.3561 \\ -0.6010 & -0.6152 & 0.3932 & 0.3202 & 0.0572 \end{bmatrix}.$$

Звідси видно, що сумарна вибіркова дисперсія складає 82116. Дисперсія головної компоненти складає 78,2% сумарної дисперсії, а три головні компоненти вичерпують 99,2% повної дисперсії. Для фільтрації оцінки обмежимося трьома власними векторами коваріаційної матриці ($\nu = 3$). Тоді маємо

$$\mathbf{V}_3=\begin{bmatrix} -0.2463 & 0.5968 & 0.7071 & 0 & 0 \\ -0.3559 & 0.4432 & -0.1751 & 0 & 0 \\ -0.4670 & 0.2426 & -0.5148 & 0 & 0 \\ -0.4831 & -0.1000 & -0.2230 & 0 & 0 \\ -0.6010 & -0.6152 & 0.3932 & 0 & 0 \end{bmatrix},\ \widehat{\mathbf{p}}=\begin{bmatrix} -0.1741 \\ 0.0686 \\ 0.0012 \\ -0.0508 \\ 0.4897 \end{bmatrix}\times 10^{-3}.$$

Усічена оцінка, підрахована за формулою (2.9), дорівнює $\mathbf{e}_{tr}$=[84.64, 92.14, 97.31, 76.96, 62.88]$^T\cdot 10^{-6}$ м. Відносна похибка усіченої оцінки, підрахована як $\left(\|\mathbf{e}_{tr}\|-\|\mathbf{e}\|\right)/\|\mathbf{e}\|$ склала $\Delta\mathbf{e}$=0,18%. В той же час оцінка за МНК дорівнює $\widehat{\mathbf{e}}$ =[188.3, 238.3, 419.8, 58.8, 74.6]$^T\cdot 10^{-6}$ м. Відносна похибка ОНК склала $\Delta\mathbf{e}$=182%, тобто точність розв'язку з використанням усіченої оцінки порівняно із звичайним ОНК збільшилась у 1167 разів. Ці цифри наочно демонструють достатньо високу точність і ефективність описаного статистичного методу одержання регулярних розв'язків лінійних обернених задач за допомогою лінійної фільтрації ОНК з залученням методу головних компонент.

Висновки

Отже, для забезпечення стійкості розв'язків лінійних некоректно поставлених задач на прикладі задачі ідентифікації ексцентриситетів ротора запропоновано використання методу усіченої оцінки з використанням методу головних компонент як лінійної фільтрації оцінок найменших квадратів. Суть фільтрації полягає у такій дії на ОНК, яка б істотно звузила еліпсоїд розсіяння ОНК за допомогою стиснення інформації, що міститься у матриці розсіяння, завдяки «усіченню» «хвоста» спектра матриці Фішера.

Продемонстровано високу ефективність методу усічених оцінок для розв'язання оберненої задачі визначення невідомих ексцентриситетів ротора компресора авіадвигуна АИ-20 за допомогою експериментально визначених коефіцієнтів впливу і прогинів ротора.

Література

1. Андрушевский Н.М. Анализ устойчивости решений систем линейных алгебраических уравнений : учебное пособие / Н.М. Андрушевский. – М. : Издательский отдел факультета ВМиК МГУ имени М.В. Ломоносова; МАКС Пресс, 2008. – 71 с.

2. Петров Ю.П. Как получать надежные решения систем уравнений / Ю.П. Петров. – СПб : БХВ-Петербург, 2009. – 176 с.

3. Горошко А.В. Шляхи підвищення точності розв'язків зворотних задач / А.В. Горошко, В.П. Ройзман // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 6. – С. 60–69.

4. Goroshko A.V. Statistical Methods for Providing the Stability of the Solutions of Inverse Problems and Their Application to Decrease Rotor Vibroactivity / A.V. Goroshko, V.P. Roizman // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2015. – Vol. 44, № 3. – P. 232–238.

5. Теребиж В.Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач / В.Ю. Теребиж. – М. : ФИМЗМАТЛИТ, 2005. – 376 с.

6. MathWorks. The MathWorks, Inc. 1994–2014. URL: http://www.mathworks.com/

Рецензія/Peer review : 1.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Ройзман В.П.

УДК 678.023.5

О.М. СИНЮК, М.Є. СКИБА
Хмельницький національний університет

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОШАРОВИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Запропонований метод визначення ефективних властивостей багатошарових полімерних матеріалів і отримані вирази, що дозволяють визначити повний комплект релаксаційних характеристик багатошарового полімерного матеріалу при визначеній орієнтації моношарів, дають можливість визначити мінімальні технологічні зусилля, які необхідні для розшаровування цього матеріалу.

Ключеві слова: полімер, властивості, моношари, орієнтація, зусилля, розшарування.

O.M. SYNYUK, M.Y. SKYBA
Khmelnytskyi National University

THE METHOD FOR DETERMINING EFFECTIVE PROPERTIES OF MULTILAYER POLYMER MATERIAL

The proposed method of identifying effective properties of multilayer polymer material and the resulting expressions determine the complete set of relaxation features of multilayer polymer material in a defined orientation of monolayer, and make it possible to determine the minimal technical effort necessary for separation of the material.

Keywords: polymer, properties, monolayers, orientation, effort, separation.

Сьогодні багатошарові і комбіновані матеріали є одним з видів композиційних матеріалів. Тому поділ полімерних матеріалів на багатошарові і комбіновані досить умовно. Термін "багатошарові матеріали" відноситься до групи матеріалів, що складаються тільки з шарів синтетичних полімерів, в той час як до складу комбінованих матеріалів входять шари полімерних матеріалів та матеріалів різного типу (папір, фольга, тканина).

Порядок чергування шарів, тобто структура багатошарового полімерного і композиційного матеріалу, визначається його функціональним призначенням. Зовнішній шар (субстрат) здійснює захист від зовнішнього впливу, а також служить основою для нанесення барвистою друку. Зазвичай це двовісно-орієнтовані поліефірні, поліпропіленові або поліамідні плівки, папір, картон.

Комбіновані і багатошарові матеріали знаходять широке застосування в якості упаковки. Це пояснюється практично необмеженими можливостями варіювання їх властивостей за рахунок: вибору складу композиційного матеріалу; встановлення порядку чергування шарів; забезпечення необхідного рівня адгезійної взаємодії між шарами; вибору оптимальної технології і обладнання для отримання конкретного матеріалу.

Як відомо з [1, 2, 5] більшу частину полімерних відходів представляють пакувальні матеріали. Той факт, що останнім часом величезна кількість упаковок проводиться з багатошарових матеріалів, говорить про те, що утилізація використаних упаковок ускладнюється. Тобто перед тим як починати переробку полімерного матеріалу його необхідно відокремити від іншого полімерного матеріалу або матеріалу іншого типу.

Більшість вчених займалися і займаються проблемою переробки відходів полімерних матеріалів, починаючи моделювати процес переробки, минаючи етап відділення одного матеріалу від іншого, який є необхідним у випадку подрібнення багатошарових полімерних виробів [1–12]. В роботах [1, 2, 4, 5] авторами розглядається процес сортування окремих фракцій основного матеріалу, але при цьому зовсім не приділяється увага процесу відокремлення шарів у багатошаровому полімерному виробі.

Процес відділення шарів синтетичних полімерів один від одного або відділення полімерного шару від інших матеріалів (наприклад, фольги, паперу, тканини і т.д.) повинен передувати сортуванні та подальшої утилізації полімерних відходів. Саме цій проблемі присвячуються наші дослідження.

Основна частина. Структуру багатошарових полімерних матеріалів будемо моделювати двох або багатоелементним шаруватим композиційним середовищем, при цьому будемо розглядати це середовище як систему анізотропних пружних елементів [13, 14].

В роботі [13] отримана система з шести рівнянь, яка встановлює взаємозв’язок між основними в'язко пружними параметрами полімерного матеріалу і може вважатися моделлю ізотропного орієнтованого полімеру.

$$\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{pmatrix} \quad \text{або} \quad \varepsilon_i = S_{ij}\cdot\sigma_j,\ (i,j=1,2,3,4,5,6)\ , \qquad (1)$$

де E_{ij} – модулі пружності (в'язко пружні модулі), ν_{ij} – коефіцієнти Пуассона (перший індекс показує напрямок прикладеного навантаження, а другий – напрямок зміни поперечних розмірів), G_{ij} – модулі зсуву (подвійний індекс вказує площину зсуву), ε_i і σ_j – відповідно тензори деформацій і напружень першого рангу, S_{ij} – тензор податливостей другого рангу (або тензор коефіцієнтів, що описують в'язко пружні властивості полімерів).

Із властивості симетрії матеріалу $\left[S_{ij}\right]=\left[S_{ji}\right]$ та з рівняння (1) витікає співвідношення

$$\nu_{ij}E_j=\nu_{ji}E_i\,. \qquad (2)$$

Тут підсумовування за індексами, що повторюються, не проводиться.

Формування поверхонь багатошарових полімерних виробів відбувається в умовах, коли формований матеріал моношару знаходиться в умовах плоского напруженого стану. В цьому випадку маємо $\sigma_3=\sigma_{33}=0;\ \sigma_4=\sigma_{23}=0;\ \sigma_5=\sigma_{13}=0$ [13], і підставляючи ці умови в рівняння (1) отримаємо

$$\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0\\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}. \qquad (2)$$

З системи (2) видно, що для опису поведінки моношару необхідно мати значення чотирьох незалежних в'язко пружних констант.

З рівняння (2) може бути отримане зворотне співвідношення

$$\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & 0\\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}}\end{pmatrix}^{-1}\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}. \qquad (3)$$

Обернену матрицю визначимо, використовуючи відому формулу перетворення $C=S^{-1}=\frac{1}{|S|}\cdot S_*^T$, де $|S|$ – визначник вихідної матриці S; S_*^T – транспонована матриця алгебраїчних доповнень відповідних елементів матриці S. В результаті отримаємо

$$\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{E_{11}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & \frac{\nu_{21}E_{11}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & 0\\ \frac{\nu_{12}E_{22}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & \frac{E_{22}}{1-\nu_{21}\nu_{12}} & 0\\ 0 & 0 & G_{12}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}\quad \text{або}\quad \sigma_i=C_{ij}\cdot\varepsilon_j,\ (i,j=1,2,3,4,5,6)\ . \tag{4}$$

Взаємозв'язок між компонентами в'язко пружними компонентами з рівняння (4) і константами C_{ij} [13] легко встановити, якщо покласти, що напруження σ_3 дорівнює нулю [15]. В результаті отримаємо таку систему рівнянь

$$\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}C_{11}-\frac{C_{13}^2}{C_{33}} & C_{12}-\frac{C_{13}\cdot C_{23}}{C_{33}} & 0\\ C_{12}-\frac{C_{13}\cdot C_{23}}{C_{33}} & C_{22}-\frac{C_{23}^2}{C_{33}} & 0\\ 0 & 0 & C_{66}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}. \tag{5}$$

Введемо такі позначення

$Q_{11}=C_{11}-C_{13}^2/C_{33}$; $Q_{12}=Q_{21}=C_{12}-C_{13}C_{23}/C_{33}$; $Q_{22}=C_{22}-C_{23}^2/C_{33}$; $Q_{66}=C_{66}$.

Тоді система рівнянь (5) перепишеться в такий спосіб

$$\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{21} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}. \tag{6}$$

При формуванні багатошарового полімерного виробу і залежно від технології процесу, окремі моношари можуть бути повернуті один відносно другого на різні кути в площині формування. Але при цьому виникає завдання визначення релаксаційних властивостей окремих моношарів у напрямку дії системи сил.

При повороті системи координат відносно однієї з осей, що є перпендикулярною площині симетрії, у напрямку дії прикладених навантажень (рис. 1) змінюються в'язко пружні властивості полімерного матеріалу, які можна визначити з умови інваріантності в'язко пружного потенціалу [13].

Отже, для матеріалу моношару, система координат якого повернена відносно осі, що є перпендикулярною площині симетрії, закон перетворення тензора C_{ijkl} в узагальненому законі Гука [13, 16, 17] у в'язко пружній постановці для анізотропних матеріалів буде мати такий вигляд [15].

$$C'_{ijkl}=a_{im}a_{jn}a_{ko}a_{lp}C_{mnop} \tag{7}$$

Приймемо $1'$, $2'$, $3'$ (або x', y', z') - нові осі системи координат 1, 2, 3 (або x, y, z), повернені відносно осі 3 (або z), тоді відповідно до [15] можна записати

$$\begin{aligned}
C'_{11}&=m^4C_{11}+2m^2n^2\cdot(C_{12}+2C_{66})+4mn\cdot(m^2C_{16}+n^2C_{26})+n^4C_{22},\\
C'_{12}&=m^2n^2\cdot(C_{11}+C_{22}-4C_{66})-2mn\cdot(m^2-n^2)\cdot(C_{16}-C_{26})+(m^4+n^4)\cdot C_{12},\\
C'_{13}&=m^2C_{13}+n^2C_{23}+2mnC_{36},\\
C'_{16}&=m^2\cdot(m^2-3n^2)\cdot C_{16}-mn\cdot(m^2C_{11}-n^2C_{22}-(m^2-n^2)\cdot(C_{12}+2C_{66}))+n^2\cdot(3m^2-n^2)\cdot C_{26},\\
C'_{22}&=n^4C_{11}+2m^2n^2\cdot(C_{12}+2C_{66})-4mn\cdot(m^2C_{26}+n^2C_{16})+m^4C_{22},\\
C'_{23}&=n^2C_{13}+m^2C_{23}-2mnC_{36},\\
C'_{26}&=m^2\cdot(m^2-3n^2)\cdot C_{26}-mn\cdot(n^2C_{11}-m^2C_{22}+(m^2-n^2)\cdot(C_{12}+2C_{66}))+n^2\cdot(3m^2-n^2)\cdot C_{16},\\
C'_{33}&=C_{33},\\
C'_{36}&=(m^2-n^2)\cdot C_{36}+mn\cdot(C_{23}-C_{13}),\\
C'_{44}&=m^2C_{44}-2mnC_{45}+n^2C_{55},\\
C'_{45}&=(m^2-n^2)\cdot C_{45}+mn\cdot(C_{44}-C_{55}),\\
C'_{55}&=m^2C_{55}+2mnC_{45}+n^2C_{44},\\
C'_{66}&=m^2n^2\cdot(C_{11}+C_{22}-2C_{12})+2mn\cdot(m^2-n^2)\cdot(C_{22}-C_{16})+(m^2-n^2)^2\cdot C_{66},
\end{aligned} \tag{8}$$

де $n=\sin\theta$ $m=\cos\theta$, θ – кут повороту.

Отримаємо формули перетворення для співвідношення напруження – деформація при тому ж таки плоскому напруженому стані. Для ортотропного матеріалу, що володіє тільки однією площиною симетрії, яка співпадає з площиною 1, 2 (або x, y) системи координат, співвідношення напруження – деформація (6) можна узагальнити таким чином:

$$\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}Q_{11} & Q_{12} & Q_{16}\\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26}\\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{66}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}, \tag{9}$$

де

$$Q_{ij}=C_{ij}-\frac{C_{i3}C_{j3}}{C_{33}}. \tag{10}$$

Наявність компонент $Q_{16}=Q_{61}, Q_{26}=Q_{62}$ в (10) відображає взаємодію між нормальними або дотичними напруженнями і деформаціями. Компоненти Q_{ij} та C_{ij} при повороті системи координат підпорядковуються одному і тому ж закону перетворення (7) як компоненти тензора четвертого рангу. Відповідно до [18] перетворення (8) можна записати в досить компактній формі.

Ввівши позначення

$$\begin{aligned}
m^4&=\frac{1}{8}\left(3+4\cos 2\theta+\cos 4\theta\right),\\
m^3n&=\frac{1}{8}\left(2\sin 2\theta+\sin 4\theta\right),\\
m^2n^2&=\frac{1}{8}\left(1-\cos 4\theta\right), \qquad ,\\
mn^3&=\frac{1}{8}\left(2\sin 2\theta-\sin 4\theta\right),\\
n^4&=\frac{1}{8}\left(3-4\cos 2\theta+\cos 4\theta\right)
\end{aligned} \tag{11}$$

і підставляючи їх в (9) з врахуванням (8) компоненти Q_{ij} перетворяться до такого вигляду

$$\begin{pmatrix}Q'_{11}\\ Q'_{22}\\ Q'_{12}\\ Q'_{66}\\ 2Q'_{16}\\ 2Q'_{26}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}U_1 & U_2 & 2U_6 & U_3 & U_7\\ U_1 & -U_2 & -2U_6 & U_3 & U_7\\ U_4 & 0 & 0 & -U_3 & -U_7\\ U_5 & 0 & 0 & -U_3 & -U_7\\ 0 & 2U_6 & -U_2 & 2U_7 & -2U_3\\ 0 & 2U_6 & -U_2 & -2U_7 & 2U_3\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1\\ \cos 2\theta\\ \sin 2\theta\\ \cos 4\theta\\ \sin 4\theta\end{pmatrix}, \tag{12}$$

де

$$\begin{aligned}
U_1&=\frac{1}{8}\left(3Q_{11}+3Q_{22}+2Q_{12}+4Q_{66}\right),\\
U_2&=\frac{1}{2}\left(Q_{11}-Q_{22}\right),\\
U_3&=\frac{1}{8}\left(Q_{11}+Q_{22}-2Q_{12}-4Q_{66}\right),\\
U_4&=\frac{1}{8}\left(Q_{11}+Q_{22}+6Q_{12}-4Q_{66}\right), \quad ,\\
U_5&=\frac{1}{8}\left(Q_{11}+Q_{22}-2Q_{12}+4Q_{66}\right),\\
U_6&=\frac{1}{2}\left(Q_{16}+Q_{26}\right),\\
U_7&=\frac{1}{2}\left(Q_{16}-Q_{26}\right).
\end{aligned} \tag{13}$$

Безпосередньо з системи рівнянь (12) слідує ряд важливих інваріантних властивостей

$$Q'_{11}+Q'_{22}+2Q'_{12}=Q_{11}+Q_{22}+2Q_{12},$$
$$Q'_{66}-Q'_{12}=Q_{66}-Q_{12}. \quad (14)$$

Тепер уявимо, що багатошаровий полімерний матеріал утворений регулярною послідовністю ортотропних шарів [13].

Для того, щоб відшарувати один шар від іншого необхідно створити такий напружений стан багатошарового полімерного матеріалу, в результаті якого спочатку під дією напруження зсуву один шар полімеру зсунеться відносно іншого, руйнуючи тим самим адгезійні зв'язки між шарами.

Розглянемо створення такого плоского напруженого стану, який призведе до зсуву одного шару відносно іншого. Припустимо, що два або більше однакових шари укладені послідовно кожен з поворотом відносно попереднього на деякий однаковий кут. Рівнодіючі напружень для такого багатошарового полімерного матеріалу записується відповідно до [15] у такому вигляді

$$\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}B_{11} & B_{12} & B_{16}\\ B_{21} & B_{22} & B_{26}\\ B_{61} & B_{62} & B_{66}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix}, \quad (15)$$

де

$$B_{ij}=\sum_{k=1}^{n}\left(Q_{ij}\right)_k h_k\ , \quad (16)$$

де h_k – товщина k-го шару багатошарового полімерного матеріалу.

Розглянемо для прикладу член B_{11}. Перепишемо рівняння (16) у такому вигляді

$$B'_{11}=\sum_{k=1}^{n}\left(Q'_{11}\right)_k h_k\ , \quad (17)$$

і визначимо значення в'язко пружної константи B'_{11} в напрямку i. Приймемо, що вісі координатної системи 1, 2 співпадають з головними напрямками ортотропії даного шару. Таким чином, з рівняння (12) випливає

$$\left(Q'_{11}\right)_k=U_1+U_2\cos 2\theta_k+U_3\cos 4\theta_k\ , \quad (18)$$

де θ_k – кут між віссю 1 шару k і віссю $1'$ багатошарового полімерного матеріалу. Позначимо загальну товщину багатошарового матеріалу через h. Тоді, якщо всі моношари будуть однакові за товщиною, то товщина окремого моношару буде визначатися за такою формулою

$$h_k=\frac{h}{n}. \quad (19)$$

З рівнянь (17) та (18) з урахуванням (19) отримаємо

$$B'_{11}=\frac{h}{n}\left(U_1+U_2\sum_{k=1}^{n}\cos 2\theta_k+U_3\sum_{k=1}^{n}\cos 4\theta_k\right). \quad (20)$$

Нехай будь-який напрямок деформації багатошарового полімерного матеріалу буде повернутий на кут ϕ відносно осі $1'$. Тоді технологічні, в'язко пружні та інші властивості багатошарового полімерного матеріалу в напрямку, повернутому щодо осі $1'$ на кут ϕ, можна виразити з рівняння (20)

$$B''_{11}=\frac{h}{n}\left(U_1+U_2\sum_{k=1}^{n}\cos 2\left(\theta_k-\phi\right)+U_3\sum_{k=1}^{n}\cos 4\left(\theta_k-\phi\right)\right). \quad (21)$$

Використовуючи тригонометричні тотожності отримаємо

$$B''_{11}=\frac{h}{n}\left(U_1+U_2\cos 2\phi\sum_{k=1}^{n}\cos 2\theta_k+U_3\sin 2\phi\sum_{k=1}^{n}\sin 2\theta_k+U_3\left(\cos 4\phi\sum_{k=1}^{n}\cos 4\theta_k+\sin 4\phi\sum_{k=1}^{n}\sin 4\theta_k\right)\right). \quad (22)$$

Аналогічно можна отримати вирази для повного комплекту в'язко пружних постійних багатошарового полімерного матеріалу, необхідних для визначення технологічної деформації, що призведе до його розшаровування.

Кут між шарами в n-шаровому пакеті дорівнює π/n, і типова сума, що входить в рівняння (22), буде мати такий вигляд

$$\sum_{k=1}^{n}\cos 2\theta_k=\cos\frac{2\pi}{n}+\cos\frac{4\pi}{n}+\ldots+\cos 2\pi. \quad (23)$$

Рівняння (23) можна переписати таким чином

$$\cos x+\cos 2x+\ldots+\cos nx=\frac{\sin\left(n+1/2\right)x}{2\sin\left(x/2\right)}-\frac{1}{2}. \quad (24)$$

Використовуючи в (24) позначення $x=2\pi/n$ отримаємо

$$\sum_{k=1}^{n}\cos 2\theta_k = 0\,.$$

Таким чином всі інші суми в рівнянні (22) будуть дорівнювати нулю, але тільки для $n \geq 3$, і B''_{11} в (22) не залежить від ϕ

$$B''_{11} = \frac{h}{n}U_1\,. \tag{25}$$

Аналогічно $B'_{ij} = const$ і не залежить від орієнтації осей $1', 2'$. Але, як зазначалось раніше, отриманий результат не справедливий для $n = 2$. В цьому випадку для визначення компонент використовуються рівняння (21) і (22).

З рівняння (15) може бути отримане зворотне співвідношення

$$\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_6\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}L_{11} & L_{12} & L_{16}\\ L_{21} & L_{22} & L_{26}\\ L_{61} & L_{62} & L_{66}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_6\end{pmatrix}, \tag{26}$$

де $L_{11}...L_{66}$ – податливості багатошарового полімерного матеріалу, $L = B^{-1} = \frac{1}{|B|}\cdot B_*^T$, де $|B|$ – визначник вихідної матриці B; B_*^T – транспонована матриця алгебраїчних доповнень відповідних елементів матриці B.

При рішенні задачі у разі багатошарового полімерного матеріалу, складеного з n анізотропних моношарів, знаючи в'язко пружні властивості кожного шару, можна використовуючи викладений вище метод визначати технологічні деформації зсуву, які необхідно створити технологічним обладнанням, для забезпечення розшарування даного полімерного пакету.

Проведемо дослідження плоского напруженого стану двошарового полімерного виробу (рис. 1), моношари якого повернені один до іншого так, щоб багатошаровий полімерний матеріал був збалансований.

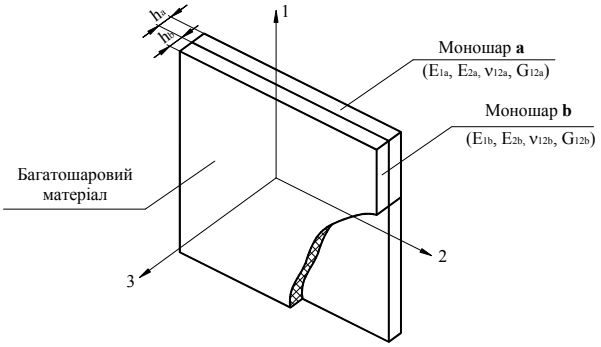


Рис. 1. Модель двошарового полімерного матеріалу

Збалансованим багатошаровим матеріалом будемо вважати такий матеріал, в якому моношари знаходиться в умовах плоского напруженого стану, і розміщуються таким чином, щоб їхні головні осі симетрії були паралельними.

Для того, щоб забезпечити розшарування багатошарового полімеру, необхідно між шарами створити такі нормальні напруження σ_{2k} і напруження зсуву σ_{6k}, щоб вони перевищили допустимі напруження, що створюються силами адгезії.

З рівняння (2), враховуючі введені в роботі [13] позначення, визначимо деформації

– в шарі 1

$$\varepsilon_{11a} = \frac{\sigma_{11a}}{E_{11a}} - \sigma_{22a}\frac{\nu_{21a}}{E_{22a}};$$

$$\varepsilon_{22a} = -\sigma_{11a}\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}} + \frac{\sigma_{22a}}{E_{22a}};$$

$$\varepsilon_{12a} = \frac{\sigma_{12a}}{G_{12a}},$$

– в шарі 2

$$\varepsilon_{11b} = \frac{\sigma_{11b}}{E_{11b}} - \sigma_{22b}\frac{\nu_{21b}}{E_{22b}};$$

$$\varepsilon_{22a} = -\sigma_{11b}\frac{\nu_{12b}}{E_{11b}} + \frac{\sigma_{22b}}{E_{22b}}; \tag{27}$$

$$\varepsilon_{12b} = \frac{\sigma_{12b}}{G_{12b}}.$$

Так як, зовнішнє навантаження, що приводить до відокремлення шарів, задане, нормальні напруження в напрямку 1: σ_{11a} і σ_{11b} та напрямку 2: σ_{22a} і σ_{22b} і напруження зсуву σ_{12a} і σ_{12b} мають бути еквівалентними середньому нормальному або тангенціальному напруженню.

$$\begin{aligned}\sigma_{11a}h_a + \sigma_{11b}h_b &= \langle\sigma_{11}\rangle(h_a + h_b),\\ \sigma_{22a}h_a + \sigma_{22b}h_b &= \langle\sigma_{22}\rangle(h_a + h_b);\\ \sigma_{12a}h_a + \sigma_{12b}h_b &= \langle\sigma_{12}\rangle(h_a + h_b).\end{aligned} \tag{28}$$

Припустимо, що нормальні напруження в напрямку 2 знаходяться в рівновазі. Отже, система рівнянь (28) перепишеться таким чином:

$$\begin{aligned}
&\sigma_{11a}h_a + \sigma_{11b}h_b = \langle\sigma\rangle(h_a + h_b),\\
&\sigma_{22a}h_a + \sigma_{22b}h_b = 0;\\
&\sigma_{12a}h_a + \sigma_{12b}h_b = \langle\sigma_{12}\rangle(h_a + h_b),
\end{aligned} \tag{29}$$

де $\langle\sigma\rangle = \langle\sigma_{11}\rangle = \langle\sigma_{22}\rangle$ – еквівалентне середньому нормальному напруженню.

В'язко пружні деформації моношарів рівні між собою і рівні середнім деформаціям $\langle\varepsilon\rangle$

$$\begin{aligned}
&\varepsilon_{11a} = \varepsilon_{11b} = \langle\varepsilon_{11}\rangle;\\
&\varepsilon_{22a} = \varepsilon_{22b} = \langle\varepsilon_{22}\rangle;\\
&\varepsilon_{12a} = \varepsilon_{12b} = \langle\varepsilon_{12}\rangle.
\end{aligned} \tag{30}$$

В результаті деяких перетворень системи (27) з урахуванням співвідношень (29) та (30) отримаємо таку систему рівнянь

$$\begin{aligned}
&A_{11}\sigma_{11a} + A_{12}\sigma_{22a} = \left(\frac{\langle\sigma\rangle}{E_{11b}}\right)\left(\frac{h_a + h_b}{h_a h_b}\right),\\
&A_{21}\sigma_{11a} + A_{22}\sigma_{22a} = -\left(\nu_{12b}\frac{\langle\sigma\rangle}{E_{11b}}\right)\left(\frac{h_a + h_b}{h_a h_b}\right),\\
&A_{33}\sigma_{12a} = \left(\frac{\langle\sigma_{12}\rangle}{G_{12b}}\right)\left(\frac{h_a + h_b}{h_a h_b}\right).
\end{aligned} \tag{31}$$

де $A_{11} = \frac{1}{E_{11a}h_a} + \frac{1}{E_{11b}h_b}$; $A_{22} = \frac{1}{E_{22a}h_a} + \frac{1}{E_{22b}h_b}$; $A_{33} = \frac{1}{G_{12a}h_a} + \frac{1}{G_{12b}h_b}$; $A_{12} = A_{21} = -\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} - \frac{\nu_{12b}}{E_{11b}h_b}$.

Вирішуючи рівняння (31) відносно нормальних напружень σ_{11a} і σ_{22a} отримаємо

$$\begin{aligned}
&\sigma_{11a} = -\frac{\langle\sigma\rangle}{E_{11b}}\left(\frac{h_a + h_b}{h_a h_b}\right)\left(\frac{A_{22} + \nu_{12b}A_{12}}{A_{11}A_{22} + A_{12}^2}\right),\\
&\sigma_{22a} = -\frac{\langle\sigma\rangle}{E_{22b}}\left(\frac{h_a + h_b}{h_a h_b}\right)\left(\frac{A_{12} + \nu_{12b}A_{11}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}\right),\\
&\sigma_{12a} = \langle\sigma_{12}\rangle\left(\frac{h_a + h_b}{h_a h_b}\right)\left(\frac{1}{A_{33}}\right).
\end{aligned} \tag{32}$$

З рівняння (26) або, у випадку дослідження плоского напруженого стану двошарового матеріалу, з рівняння (2), враховуючи рівняння (32) та (31), отримаємо деформації моношарів і всього матеріалу в напрямках дії технологічного навантаження

$$\begin{aligned}
&\varepsilon_{11a} = \frac{\langle\sigma\rangle}{E_{11b}h_b}\frac{(h_a + h_b)}{E_{11a}h_a}\cdot\frac{\left(\frac{1}{E_{22a}h_a} + \frac{1}{E_{22b}h_b}\right) - \left(\frac{\nu_{12b}\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12b}^2}{E_{11b}h_b}\right)}{\left(\frac{1}{E_{11a}h_a} + \frac{1}{E_{11b}h_b}\right)\left(\frac{1}{E_{22a}h_a} + \frac{1}{E_{22b}h_b}\right) - \left(\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12b}}{E_{11b}h_b}\right)^2},\\
&\varepsilon_{22a} = \frac{\langle\sigma\rangle}{E_{11b}h_b}\frac{(h_a + h_b)}{E_{11a}h_a}\cdot\frac{\nu_{12b}\left(\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12a}}{E_{11b}h_b}\right) - \left(\frac{\nu_{12a}^2}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12a}\nu_{12b}}{E_{11b}h_b}\right)}{\left(\frac{1}{E_{11a}h_a} + \frac{1}{E_{11b}h_b}\right)\left(\frac{1}{E_{22a}h_a} + \frac{1}{E_{22b}h_b}\right) - \left(\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12b}}{E_{11b}h_b}\right)^2},\\
&\varepsilon_{12a} = \frac{\langle\sigma_{12}\rangle(h_a + h_b)}{G_{12a}h_a + G_{12b}h_b}.
\end{aligned} \tag{33}$$

Релаксаційний модуль багатошарового полімерного матеріалу E_{11} у напрямку 1 знайдемо з такої умови

$$\langle\sigma\rangle = E_{11}\varepsilon_{11} = E_{11}\varepsilon_{11a}, \tag{34}$$

або

$$E_{11} = \frac{\langle \sigma \rangle}{\varepsilon_{11a}}.$$

Підставивши в рівняння (34) перше рівняння системи (33) отримаємо

$$E_{11} = \frac{E_{11b}h_b E_{11a}h_a}{(h_a + h_b)} \cdot \frac{\left(\frac{1}{E_{11a}h_a} + \frac{1}{E_{11b}h_b}\right)\left(\frac{1}{E_{22a}h_a} + \frac{1}{E_{22b}h_b}\right) - \left(\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12b}}{E_{11b}h_b}\right)^2}{\left(\frac{1}{E_{22a}h_a} + \frac{1}{E_{22b}h_b}\right) - \left(\frac{\nu_{12b}\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12b}^2}{E_{11b}h_b}\right)}. \quad (35)$$

Коефіцієнт Пуассона багатошарового полімерного матеріалу ν_{12} знайдемо з умови (30)

$$\varepsilon_{22a} = \langle \varepsilon_{22} \rangle = -\nu_{12} \langle \varepsilon_{11} \rangle = -\nu_{12}\varepsilon_{11a} \text{ або } \nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22a}}{\varepsilon_{11a}}. \quad (36)$$

Підставляючи в вираз (36) рівняння перше і друге рівняння системи (33), отримаємо

$$\nu_{12} = \frac{\nu_{12b}\nu_{12a}\left(\frac{1}{E_{11a}h_a} + \frac{1}{E_{11b}h_b}\right) - \left(\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12b}}{E_{11b}h_b}\right)}{\nu_{12b}\left(\frac{\nu_{12a}}{E_{11a}h_a} + \frac{\nu_{12b}}{E_{11b}h_b}\right) - \left(\frac{1}{E_{22a}h_a} + \frac{1}{E_{22b}h_b}\right)}. \quad (37)$$

За аналогією з рівнянь (35) і (37) можна отримати вирази для поперечного модуля релаксації E_{22} і коефіцієнта Пуассона ν_{21}, помінявши місцями індекси 1 і 2.

Релаксаційний модуль зсуву G_{12} визначимо за аналогією з E_{11} та E_{22}

$$G_{12} = \left(\frac{1}{h_a + h_b}\right)\left(G_{12a}h_a + G_{12b}h_b\right). \quad (38)$$

Отже, представлений вище метод дає можливість визначати в'язко пружні властивості багатошарового полімерного матеріалу, а це, у свою чергу, дозволить визначити мінімальні технологічні зусилля, що приводять до розшаровування матеріалу.

Висновки. В роботі було розглянуто використання методу визначення ефективних властивостей багатошарових полімерних матеріалів на прикладі двошарового виробу, моношари якого однаково орієнтовані один відносно другого, в плоскому напруженому стані. Були отримані вирази для визначення релаксаційних модулів двошарового полімерного матеріалу, а саме модуля пружності, коефіцієнта Пуассона і модуля зсуву.

В реальних умовах, звичайно, вирази для визначення в'язко пружних властивостей багатошарового полімерного матеріалу будуть складніші, але використавши їх можна розрахувати дотичні і нормальні навантаження, які мають забезпечуватися зусиллям, що створюватиме технологічне обладнання, під дією яких буде відбуватися розшарування багатошарового полімерного матеріалу.

Література

1. Мантия Ф. Ла. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла. Мантия ; пер. с англ. / под. ред. Г. Е. Заикова. – СПб : Профессия, 2006. – 400 с.

2. Williams Paul T. Waste Recycling / Paul T. Williams // Waste Treatment and Disposal. Chapter 3. – 2005. – P. 127–170.

3. Myer Kutz. Processing Postconsumer Recycled Plastics / Kutz Myer // Environmentally conscious materials and chemicals processing. – 2007. – P. 357–383.

4. Andrady Anthony. Plastics Recycling / Anthony Andrady // Plastics and the environment. – 2005. – Ch. 14. – P. 563–627.

5. Andrady Anthony. Polymers, Polymer Recycling, and Sustainability / Anthony Andrady, Johannes Brandrup // Plastics and the environment. – 2005. – Ch. 13. – P. 521–562.

6. Ignatyev I.A. Recycling of Polymers: A Review / I.A. Ignatyev, Wim Thielemans Bob VanderBeke // ChemSusChem. – 2014. – V. 7. – Issue 6. – P. 1579–1593.

7. Romer R. Recycling and Recovery of Plastics / R. Romer, J. Brandrup, M. Bittner, W. Michaeli, G. Menges // Hanser. – Munich, Germany. – 1996. – 796 p.

8. Abert J.G. Resource recovery: A new field for technology application / J.G. Abert, M.J. Zusman // AIChE journal. –1972. – V. 18. – Issue 6. – P. 1089–1106.

9. Гринин А.С. Промышленные и бытовые отходы: Хранение, утилизация, переработка / А.С. Гринин, Н.В. Новиков. – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2002. – С. 149–153.

10. Техника и технология переработки и утилизации отходов / [Найман С.М., Газеев Н.Х., Глебов А.Н., Фролов Д.В.]. – Казань : КГТУ, 2011. – 418 с.

11. Гоголь Э.В. Анализ существующих способов утилизации и переработки отходов полимеров / Э.В. Гоголь, И.Х. Мингазетдинов, Г.И. Гумерова, О.С. Егорова, С.А. Мальцева, И.Г. Григорьева, Ю.А. Тунакова // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 10. – Т. 16. – С. 163–168.

12. Місяць В.П. Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів легкої промисловості : дис. ... доктора техн. наук : 05.05.10 / Місяць Володимир Петрович. – К., 2007. – 365 с.

13. Синюк О.М. Математична модель анізотропних властивостей полімерних матеріалів / О.М. Синюк // Вісник ХНУ. – 2015. – № 1. – С. 12–18.

14. Бартенев Г.М. Курс физики полимеров / Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев. – Л. : Химия, 1976. – С. 273.

15. Кристенсен Р. Введение в механику композитов / Ричард М. Кристенсен. – М. : Мир, 1982. – 336 с.

16. Ландау Л.Д. Теоретическая физика : учеб. пособие : в 10 т. Т. VII. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

17. Блох В.И. Теория упругости / В.И. Блох. – Харьков : Издательство Харьковского университетя, 1964. – 484 с.

18. Tsai S.W. Invariant properties of composite materials / S.W. Tsai, N.J. Pagano, J.C. Halpin // Composite Materials. – 1968. – P. 233–252.

Рецензія/Peer review : 11.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Диха О.В.

УДК 681.5:004.8:004.94

Д.А. НАГОВСКИЙ
Херсонская государственная морская академия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ ЗАЩИТЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ НА СУДАХ

В работе осуществлялся поиск решения проблем, возникающих при эксплуатации судовых автоматических регуляторов напряжения. В результате анализа принципов работы, моделей и реальных действующих судовых автоматических регуляторов напряжения предложено электронное устройство, позволяющее своевременно определять и локализовать неисправные судовые дизель-генераторы, сохраняя целостность судового электрооборудования.

Ключевые слова: судовой автоматический регулятор напряжения, судовой дизель-генератор, потребитель электроэнергии, система защиты.

D.A. NAGOVSKYI
Kherson State Marine Academy

THE IMPROVEMENT OF MEANS OF AUTOMATION OF SHIP DIESEL-GENERATOR PROTECTION

Abstract – This article describes a one of solution of such problem as corruption of ship electrical equipment because of untimely reaction of ship automatic voltage regulator. There was described a problem, review of reference and constructive proposal has been given. As result of overexcitement of generator, there is a big risk to corrupt an important ship electrical equipment because of large latency of ship automatic voltage regulator. Author offers to include in ship electrical power system an additional device, which will found a faulty generators and disable them. Author offers protection device with algorithm, which works faster, .than automatic voltage regulator will do wrong correction of voltage because of faulty generator. As upgrade in future need to improve models of ship automatic voltage regulators and change rules, which describes time latency of electrical protection. It necessary to do, because needed electrical power is increased with time runs and technical evolution.

Keywords: ship automatic voltage regulator, overexcitement of generator, electrical equipment, faulty generator.

Введение. Вопросы безопасности мореплавания являются важнейшими в области судоходства. Соответственно, сохранность электрооборудования, отвечающего за живучесть судна, играет немаловажную роль в процессе эксплуатации судов. Внедрение на суда автоматических регуляторов напряжений в большинстве случаев позволяет обеспечить защиту судовых потребителей электроэнергии, в том числе и ответственных, т.е. отвечающих за живучесть судна.

Актуальность исследований. Отказ автоматического регулятора напряжения на судне может иметь тяжкие последствия. Одним из таких последствий может стать полное обесточивание судна или выход из строя генераторных агрегатов и ответственных потребителей [1, 5].

Как показывает практика[4], отказы АРН не являются редкостью, поэтому с целью предотвращения выхода из строя навигационного, бытового и иного судового оборудования, возникает необходимость повышения степени защиты от повышенного напряжения и бросков токов в сети. Такие технические решения повысят надежность электроснабжения судна в целом и, таким образом, повысят показатели живучести судна.

В современной литературе [1] существуют множества моделей судовых АРН. Одна из них показана

на рис. 1.

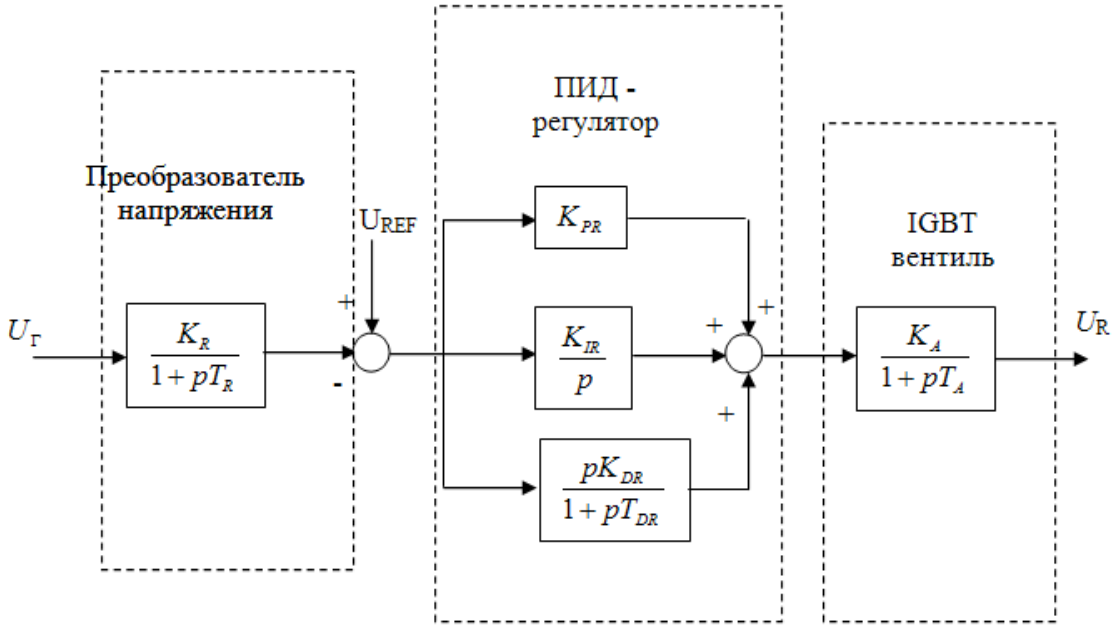


Рис. 1. Структурная модель АРН [1]

Как видно из рисунка 1, в модели присутствует множество постоянных времени, что увеличивает время реакции АРН, что, в свою очередь, может привести к выходу из строя электрооборудования судна.

Постановка задачи. Обеспечить дополнительную электрическую защиту АРН и судовых потребителей электроэнергии от повышенного напряжения и бросков тока в сети, с учетом количества работающих генераторов и режимов их работы.

Результаты исследований. Автоматический регулятор напряжения предназначен для управления током возбуждения без щеточных синхронных генераторов(БСГ)[1]. Исходное возбуждение поступает от трехфазного подвозбудителя (PMG). При этом управляющие цепи АРН отключаются от эффектов нелинейных нагрузок и уменьшается влияние частоты на напряжение генератора. Таким образом, PMG используется для лучшего возбуждения БСГ [1].

АРН измеряет напряжение генератора и управляет возбуждением для поддержания напряжения на заданном уровне, компенсируя изменение нагрузки, частоту вращения, температуру и cosφ генератора [1].

Измерение частоты цепи и частоты вращения вала генератора обеспечивает защиту от пониженной частоты системы возбуждения понижением выходного напряжения генератора пропорционально установленной частоте вращения.

Максимальное возбуждение ограничивается безопасным периодом отключения выходного устройства АРН. Это состояние сохраняется до полной остановки генератора.

АРН включает защиту от повышенного напряжения с отключением выходного устройства регулятора и возможности отключения генераторного автомата в случае различных неполадок при оптимальном возбуждении.

Принципиальная схема системы возбуждения показана на рис. 2.

Математическая модель АРН имеет вид [1]:

$$U_R = \frac{K_A}{1+pT_A}\left(K_{PR} + \frac{K_{IR}}{p} + \frac{pK_{DR}}{1+pT_{DR}}\right)\left(\frac{K_R}{1+pT_R}\sqrt{u_d^2+u_q^2} - u_{REF}\right), \quad (1)$$

где $_R$ – выходное напряжение регулятора;

K_A – коэффициент усиления напряжения;

p – оператор дифференцирования;

T_A – постоянная времени;

K_{PR}, K_{IR}, K_{DR} – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной части регулятора соответственно;

K_R – коэффициент усиления преобразователя;

T_R– постоянная времени преобразователя;

U_{REF} – напряжение уставки.

Таким образом, наличие столь многих постоянных времени накладывает ограничение на быстродействие АРН и электрической защиты в целом.

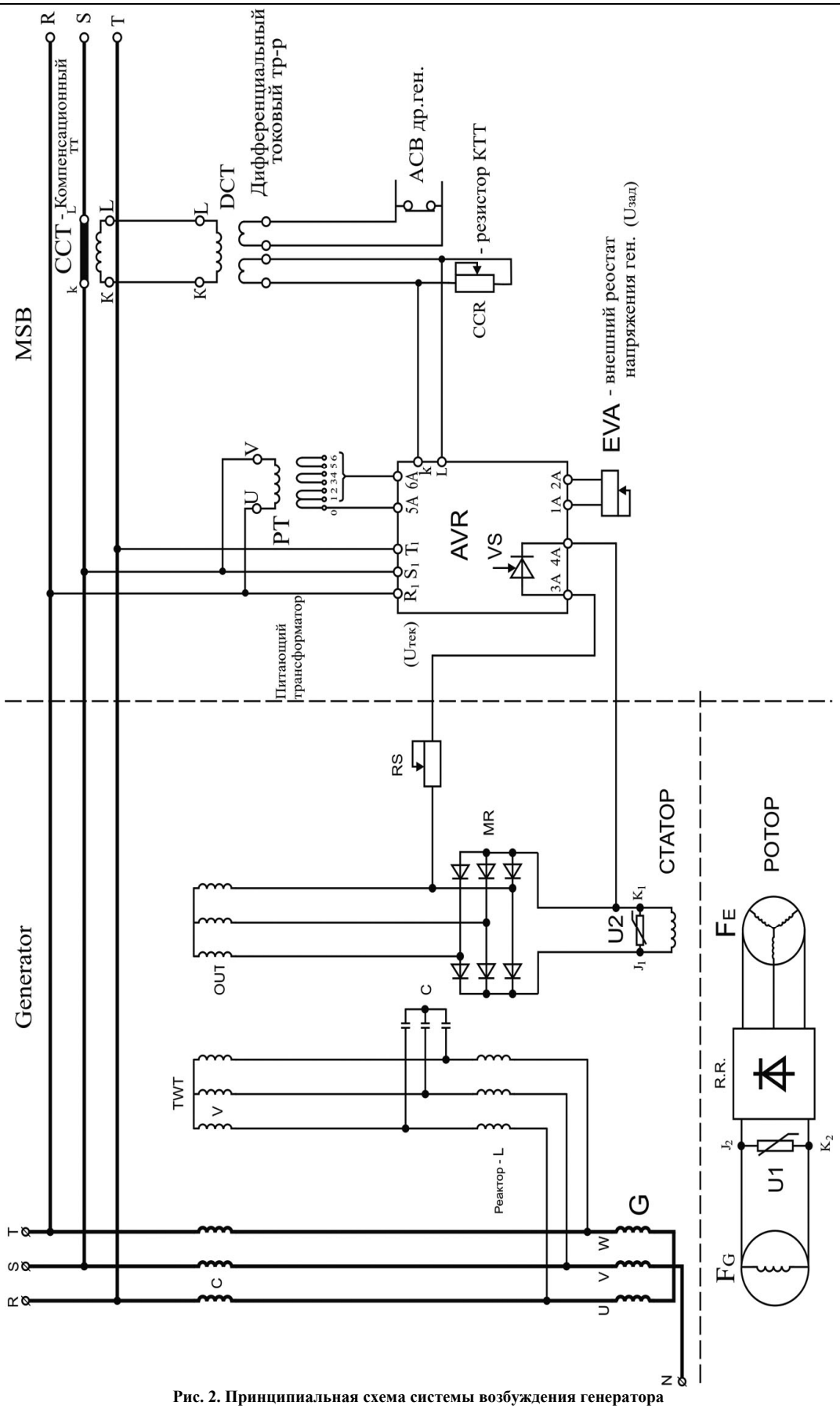


Рис. 2. Принципиальная схема системы возбуждения генератора

В результате проведенных исследований было решено, что во многих случаях предпочтительней обесточить судовое оборудование, вместо того, чтобы вывести его из строя чрезмерно превышенным напряжением питания. Тем не менее, в ряде частных случаев, может возникнуть необходимость отключать защиту, если предпочтительней поддерживать питание судна, не смотря на риски повредить оборудование.

Исходя из изложенных концепций, было разработано, установлено и протестировано устройство в виде дополнительной защиты, позволяющее реализовать предъявленные требования. Внешний вид показан на рисунке 3.

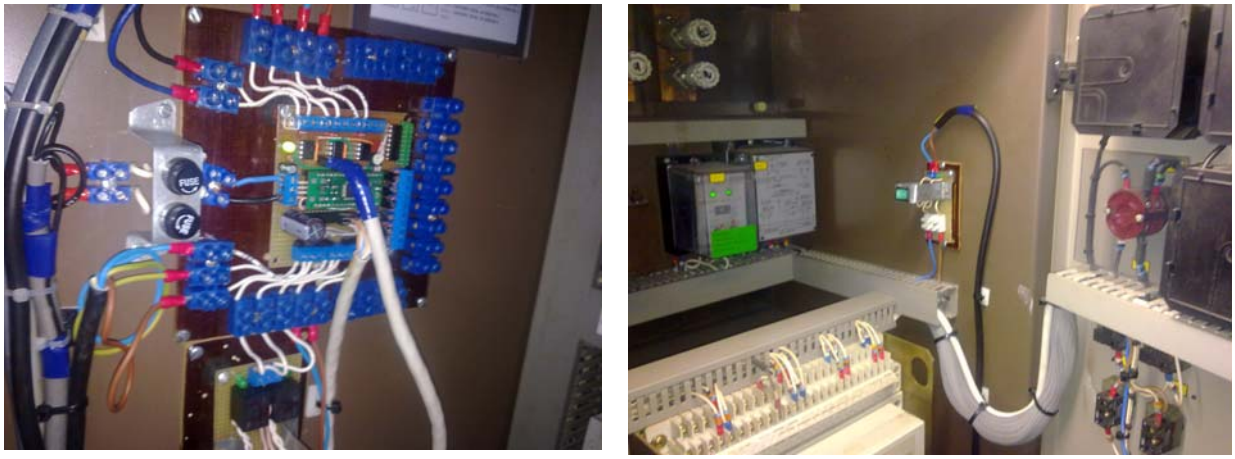


Рис. 3. Внешний вид дополнительной защиты от повышенного напряжения в судовой сети

Предложенный краткий алгоритм работы устройства состоит в следующем. Устройство защиты опрашивает по очереди генераторы и сравнивает текущее значение напряжения с заданным (напряжение на генераторе больше заданного напряжения оператором) и, если условия не удовлетворяют, подается световой и звуковой сигнал. В случае если напряжение не нормализуется более 500 мс или увеличится в промежутке этого времени на больше чем на 10% то происходит отключение генераторного автомата неисправного генератора с шин ГРЩ. После чего происходит повторный опрос на наличие напряжения на проблемном генераторе в размере выше заданного. В случае обнаружения оного происходит остановка дизель-генератора. При параллельной работе генераторов, если напряжение не удовлетворяет заданному, осуществляется процесс вывода из параллели средствами, предусмотренными при проектировании судовой электростанции. Это позволяет безошибочно определить проблемный генератор ввиду роста тока на таковом. Далее происходит отключение неработоспособного генератора от шин ГРЩ и, если напряжение на шинах ГРЩ остается выше заданного, отключается второй генератор. В случае дальнейшего наличия повышенного напряжения происходит остановка дизеля [4].

На рисунке 4 представлена структурная схема дополнительной защиты судовых дизель-генераторов [4]

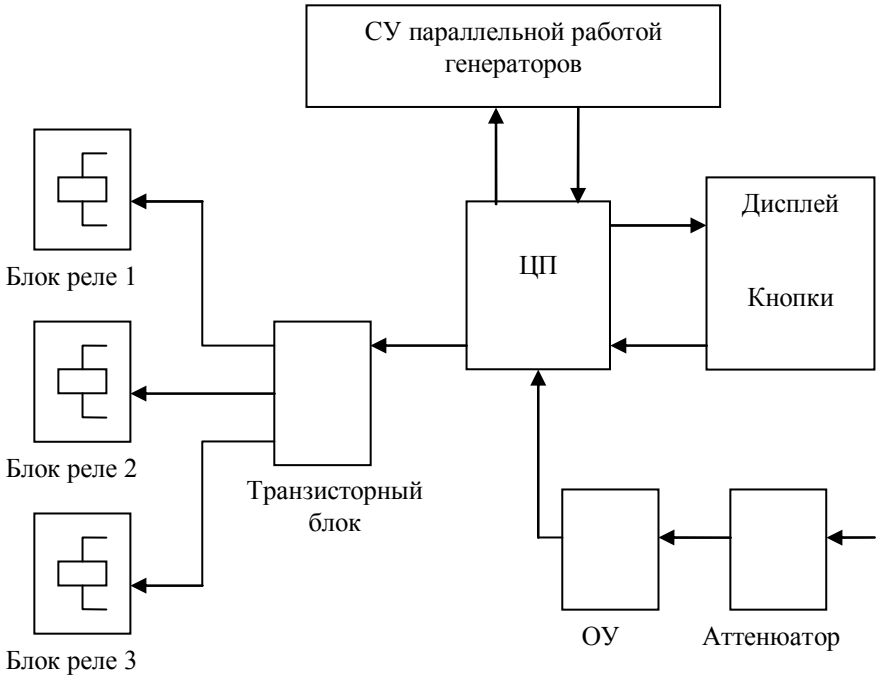


Рис. 4. Структурная схема усовершенствованной системы защиты БСГ

Здесь Uin – напряжение, входящеев устройство защиты;
ОУ – операционный усилитель;
ЦП – центральный процессор;
Аттенюатор – устройство для плавного, ступенчатого или фиксированного понижения

интенсивности электрических или электромагнитных колебаний, как средство измерений является мерой ослабления электромагнитного сигнала.

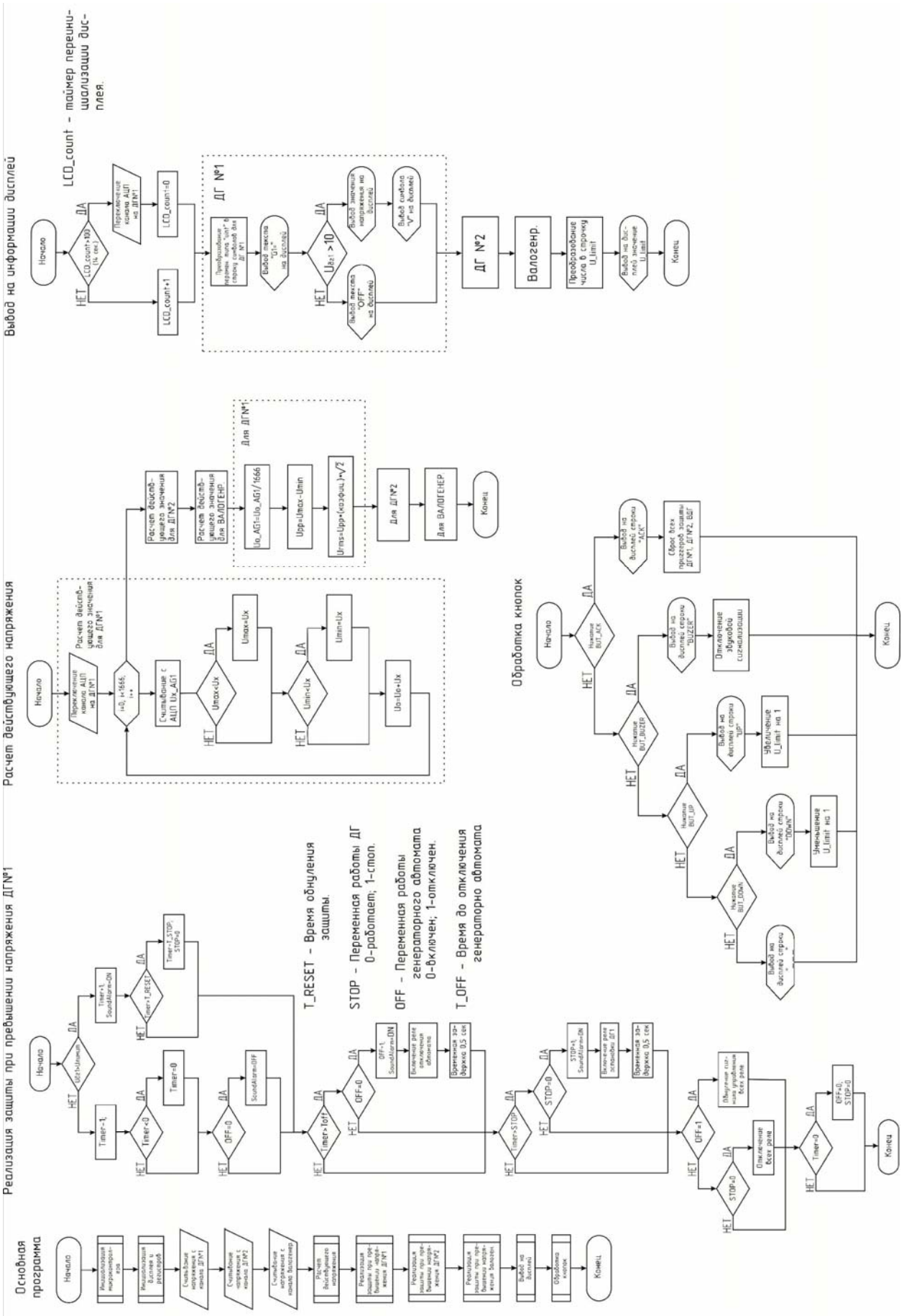


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы полученной системы защиты БСГ

Выводы. В виду важности сохранности приборов, отвечающих за живучесть судна, целесообразно совершенствовать средства и системы защиты судовых генераторов, а так же судовых потребителей. При наличии современных электронных компонентов, возможно и необходимо использовать дополнительные меры защиты вышеуказанных объектов с уставками выше, чем этого требует регистр, если это не приведет к неправильной эксплуатации оборудования и не противоречит правилам технической эксплуатации.

Литература

1. Баранов А.П. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации : учебник для вузов / А. П. Баранов, М.М. Раимов. – СПб : Элмор, 1997. – 232 с.

2. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы программы / Баранов В.Н. – М. : Додэка-XXI, 2004. – 288 с.

3. Водовозов А.М. Микроконтроллеры для систем автоматики : учебное пособие / Водовозов А.М. – Вологда : ВоГТУ, 2002. – 131 с.

4. Щербаков Ю.В. Устройство защиты от перенапряжения для судових ДГ / Ю.В. Щербаков, Д.А. Наговський // Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства : матеріали IV Всеукр. наук. конф., 20 листопада 2014 р. – Херсон : ХДМА, 2014 . – С. 411–413.

5. Мелинский Г.А. Устойчивость энергосистем. Книга 1 [Електронний ресурс] / Г.А. Мелинский, Г.В. Меркурьев. – Режим доступу : www.cpk-energo.ru/metod/u1/mm1.pdf

Рецензія/Peer review : 6.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Шарко О.В.

УДК 621.22

А.О. ТОВКАЧ , В.В. БОГАЧУК, Л.Г. КОЗЛОВ
Вінницький національний технічний університет

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІДРОПРИВОДА З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОДАЧІ НАСОСА

Розглянута схема гідропривода, розроблена у Вінницькому національному технічному університеті. На стадії проектування статичні та динамічні характеристики можуть бути оцінені на основі досліджень робочих процесів в гідроприводі, виконаних із застосуванням математичних моделей. Математична модель гідропривода сформована в середовищі MATLAB Simulink та оброблена за допомогою чисельного методу Rosenbrock. Проведені імітаційні дослідження робочих процесів в гідроприводі. Моделювання перехідного процесу підтверджує роботоздатність розробленої схеми та алгоритму керування, а також дозволяє визначити статичні та динамічні характеристики гідропривода.

Ключові слова: гідропривод, мобільні робочі машини, математичні моделі.

A.O. TOVKACH, V.V. BOGACHUK, L G. KOZLOV
Vinnytsia National Technical University

CHARACTERISTICS OF THE HYDRAULIC DRIVE WITH ELECTROHYDRAULIC PUMP DELIVERY CONTROLLER

Abstract – The hydraulic drive circuit, developed in Vinnytsia National Technical University, is considered. At the design stage static and dynamic characteristics can be estimated on the basis of investigation of hydraulic drive working processes, conducted with the application of mathematical models. Hydraulic drive mathematical model is elaborated in MATLAB Simulink environment and processed using Rosenbrock numerical method. Simulation study of the hydraulic drive working processes has been performed. Transient process simulation confirms operability of the developed circuit and of the control algorithm as well as makes it possible to determine static and dynamic characteristics of the hydraulic drive.

Keywords: hydraulic drive, mobile working machines, mathematical models.

Вступ

Останнім часом в мобільних робочих машинах різного призначення (екскаваторах, навантажувачах, тракторах) все ширше застосовуються гідроприводи з пропорційним електрогідравлічним пропорційним керуванням [1–7]. Застосування гідроприводів з електрогідравлічним пропорційним керуванням обумовлено:

- можливістю пропорційної та плавної зміни швидкості руху робочих органів;
- суттєвим покращенням динамічних характеристик;
- ефективним захистом механізмів мобільної машини від перевантажень;
- можливістю дистанційного керування гідроагрегатами із безпечної зони.

У Вінницькому національному технічному університеті розроблена схема гідропривода на основі насоса з електрогідравлічним регулятором та контролером, що має аналогові входи і виходи. Схема гідропривода представлена на рис. 1.

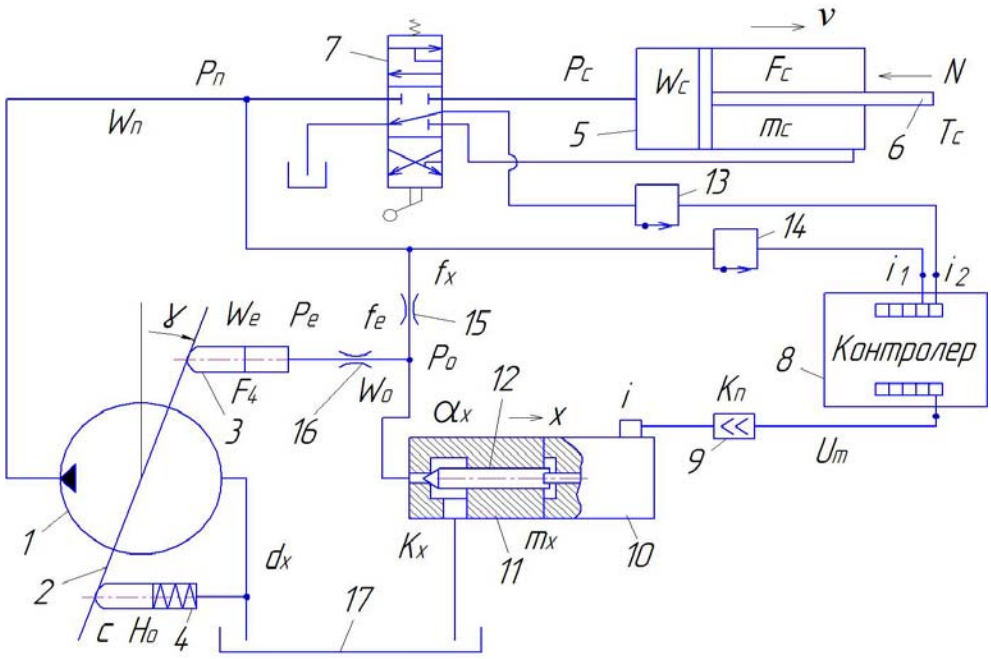


Рис. 1. Розрахункова схема гідропривода

Схема включає насос 1 з планшайбою 2, сервоциліндром 3 та пружиною 4. Насос 1 приводить до руху поршень 6 гідроциліндра 5 на який діє навантаження N. Запуск та зупинка гідроциліндра забезпечується гідророзподільником 7. Контролер 8 отримує сигнали i_1 та i_2 від датчиків тиску 14 та 13 і по спеціальному алгоритму формує сигнал керування U_m, який через підсилювач 9 поступає на електромагніт 10 та регулятор 11. Сервоклапан 12 під дією сигналу керування формує таке значення тиску p_o при якому потужність P_n, що подається регульованим насосом 1 буде підтримуватись постійною при зміні швидкості руху v штока 6 гідроциліндра, або навантаження N, що діє на гідроциліндр 5. Підтримання постійної величини потужності P_n, що подається насосом 1 до гідроциліндра дозволяє в повній мірі використовувати можливості двигуна внутрішнього згорання машини, який забезпечує роботу гідроприводу. Застосування контролера в розробленій схемі дозволяє формувати алгоритми керування насосом з урахуванням характеристик гідроагрегатів привода та особливостей протікання робочих процесів при виконанні операцій різного характеру.

При проектуванні гідроприводів мобільних робочих машин необхідно забезпечити певні статичні та динамічні характеристики. На стадії проектування статичні та динамічні характеристики можуть бути оцінені на основі досліджень робочих процесів в гідроприводі, виконаних із застосуванням математичних моделей.

Результати математичного моделювання

Математична модель гідропривода включає рівняння моментів, що діють на планшайбу 2 насоса 1 (рівняння 1), рівняння сил, що діють на шток 6 гідроциліндра 5 (рівняння 2) та на сервоклапан 12 (рівняння 3), рівняння падіння напруги в ланцюгу електромагніта 10 (рівняння 4), а також рівняння нерозривності потоків для гідроліній між насосом 1, гідророзподільником 7 та дроселем 15 (рівняння 5), між дроселем 15, демпфером 16 та сервоклапаном 11 (рівняння 6), між гідро розподільником 7 та гідроциліндром 5 (рівняння 7), між демпфером 16 та сервоциліндром 3 (рівняння 8).

Математична модель розроблена при таких допущеннях та спрощеннях. Розглядаються зосереджені параметри гідропривода; температура робочої рідини за час протікання перехідного процесу не змінюється; хвильові процесі в трубопроводах не враховуються; коефіцієнти потоку через дросельні та клапанний елемент є постійними; режим роботи гідропривода – без кавітаційний; об'єм камер гідроциліндра та сервоциліндра за час перехідного процесу не змінюються; втрати тиску в гідролініях не враховуються, за винятком нагнітальної гідролінії, що включає гідророзподільник; сила сухого тертя в гідроциліндрі не залежить від швидкості руху поршня; робота підсилювача моделюється пропорційною ланкою.

$$I\frac{d^2\gamma}{dt^2} = c(H_o + l\cdot\sin\gamma) - p_e F_4 l - \frac{\pi\cdot\rho\cdot\nu\cdot d_4\cdot l_4}{\varepsilon_o}\cdot l^2\cdot\frac{d\gamma}{dt}\cdot\cos\gamma \quad (1)$$

$$m_c\frac{d\nu}{dt} = p_c F_c - N - T_c\cdot\sin\nu \quad (2)$$

$$m_x\frac{d^2x}{dt^2} = p_o\frac{\pi d_x{}^2}{4} - k_e\cdot i - \left(\frac{\pi\cdot\rho\cdot\nu\cdot d_x\cdot l_x}{\varepsilon_x}\right)\frac{dx}{dt} \quad (3)$$

$$(A_u + B_u \cdot p_n + \frac{C_u}{p_c}) \cdot k_u = R_e \cdot i + L_e \frac{di}{dt} \quad (4)$$

$$d_7 \cdot d_8 \cdot k_1 \cdot n_n \cdot tg\gamma - k_n p_n = a + bh + c(p_n - p_c) + dh^2 + e(p_n - p_c)^2 + \\ + f(p_n - p_c) \cdot h + \mu f_x \sqrt{\frac{2(p_n - p_o)}{\rho}} + \beta W_n \frac{dp_n}{dt} \quad (5)$$

$$\mu f_x \sqrt{\frac{2(p_n - p_o)}{\rho}} = \mu \cdot \pi \cdot d_x \cdot x \cdot \sin\frac{d_x}{2} \cdot \sqrt{\frac{2p_x}{\rho}} + \beta W_o \frac{dp_o}{dt} \quad (6)$$

$$a + bh + c(p_n - p_c) + dh^2 + e(p_n - p_c)^2 + f(p_n - p_c)h = F_c \cdot v + \beta W_c \frac{dp_c}{dt} \quad (7)$$

$$\mu f_e \sqrt{\frac{2(p_o - p_e)}{\rho}} \cdot sign(p_o - p_e) = \beta W_e \frac{dp_e}{dt} - F_4 \frac{d\gamma}{dt} l - A_e p_e + B_e t^o + C_e \varepsilon_o{}^2 \quad (8)$$

При розробці математичної моделі використані такі позначення: p_n, p_c, p_o, p_e – тиски на виході насоса 1, на вході в гідроциліндр 5, на вході в сервоклапан 12, на вході в сервоциліндр 3; x – координата положення сервоклапана 12; γ – кут повороту планшайби 2, i – величина струму в електромагніті 10, v – швидкість руху поршня 6; I – момент інерції планшайби 2; c – жорсткість пружини 4; H_o – попереднє стискання пружини 4; l, l_4, l_x – плече дії сервоциліндра 3, довжина контакту сервоциліндра 3 та корпуса, l_x – довжина контакту сервоциліндра 12 та корпуса; F_4, F_c – площа поршня сервоциліндра 3, площа поршня гідроциліндра 5; ρ – густина робочої рідини; v – коефіцієнт кінематичної в'язкості; β – коефіцієнт стискання робочої рідини; μ – коефіцієнт потоку дросельних елементів; d_4, d_x – діаметри сервоциліндра 3 та сервоклапана 12; m_c, m_x – приведена маса робочого механізму до поршня 6, маса сервоклапана 12; N – зусилля робочого механізму приведене до штока 6; T_c – сила тертя в гідроциліндрі 5; ε_o, ε_x – діаметральні зазори між сервоциліндром, сервоклапаном та їх корпусами; A, B, C – коефіцієнти в формулі залежності вихідного сигналу контролера від вхідних сигналів; a, b, c, d, e, f – коефіцієнти в формулі залежності витрати через гідророзподільник 7 від відкриття h та перепаду тиску $p_n - p_c$; A_e, B_e, C_e – коефіцієнти в формулі залежності витоків з камери сервоциліндра 3; k_n, k_u, k_e, k_g – коефіцієнти витоків в насосі 1, підсилювача 9, електромагніта 10, датчиків 13, 14; R_e, L_e – активний опір та індуктивність котушки електромагніта 10; Q_n – витрата насоса 1; f_x, f_e – площі дроселя 15 та демпфера 16; W_n, W_o, W_c, W_e – об'єм гідроліній між насосом 1 і гідророзподільником 7, між дроселем 15 та сервоклапаном 12, між гідророзподільником 7 та гідроциліндром 5, між демпфером 16 та сервоциліндром 3; α_x – кут нахилу робочої кромки сервоклапана 12; i_1, i_2 – величини струмів на виході датчиків тиску 14 і 13; d_7 – діаметр кола контакту поршнів насоса з планшайбою; d_8 – діаметр поршнів регульованого насоса; k_1 – кількість поршнів регульованого насоса; n_n – частота обертання приводного валу насоса.

Контролер 8 формує алгоритм керування регулятором 11 насоса таким чином, що насос забезпечує витратну характеристику $Q=f(N)$ представлену на рис. 2. При цьому потужність P_n, що розвивається наносом, підтримується на постійному рівні, що дозволяє в повній мірі використовувати можливості приводного двигуна машини. Для забезпечення роботи гідропривода в режимі P_n=const контролер повинен формувати залежність $U_m=A_u+B_u \cdot p_n \cdot k_g+C_u/p_c \cdot k_g$, де A_u= 2,66·10^{-2}, B_u= -5,77·10^{-2}, C_u= -2,907·10^{-5}. При формуванні залежності U_m від величин тисків p_n та p_c враховано коефіцієнт передачі датчиків тиску 13 та 14 k_g=0,133·10^{-8}, а також дані базової залежності $Q=f(N)$.

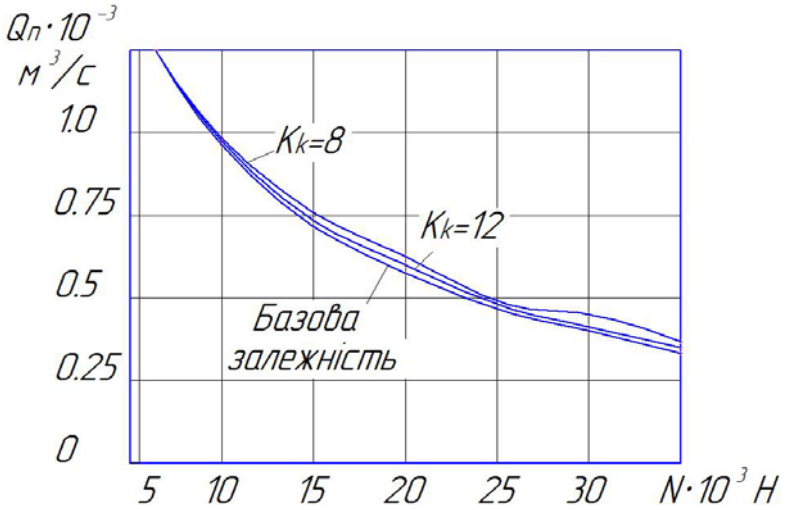


Рис. 2. Вплив величини роздільної здатності контролера на статичну характеристику гідропривода

Блок схема алгоритму, за яким працює контролер 8, реалізована в середовищі MATLAB Simulink [8]

і представлена на рис. 3. В блок схемі використані блоки Quantizer, які зберігають квантування вхідних сигналів $i_1=k_g \cdot p_n$ та $i_2=k_g \cdot p_c$ з інтервалом 0,01с, блоки Uniform Encoder, що забезпечуються кодування сигналів в контролері з роздільною здатністю 8 Біт, та блоки Uniform Decoder, що зберігають декодування вихідного сигналу контролера з роздільною здатністю 8 Біт.

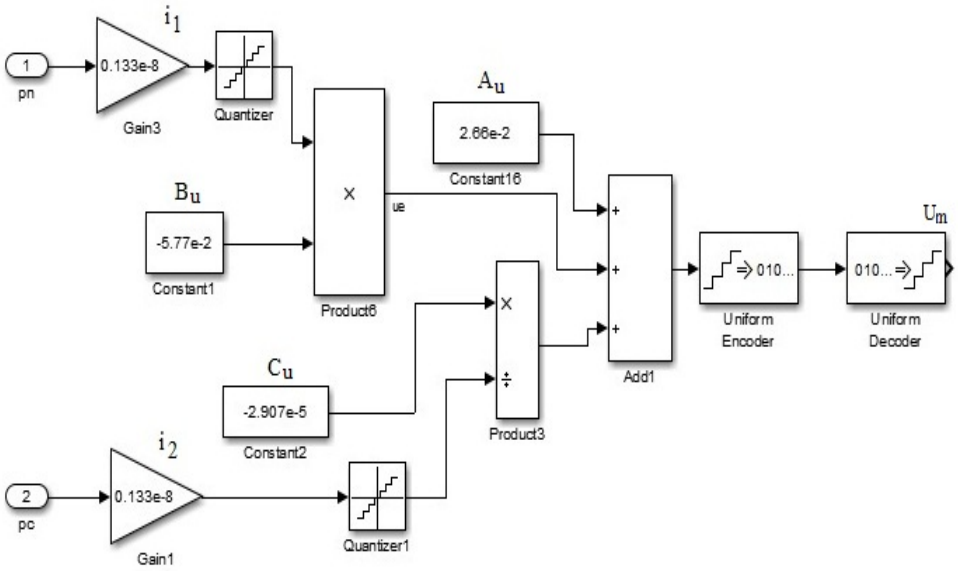


Рис. 3. Блок-схема моделі контролера

Математична модель гідропривода сформована в середовищі MATLAB Simulink та оброблена за допомогою чисельного методу Rosenbrock з абсолютною точністю $\varepsilon_a=10^{-6}$ та відносною точністю $\varepsilon_b=10^{-3}$. Параметри математичної моделі мали такі значення: m_c=1000кг, $W_n=1\cdot10^{-3}$м^3, $W_c=4\cdot10^{-3}$м^3, $\beta=0{,}6\cdot10^{-9}$м^2/Н, μ=0,67, ρ=900кг/м^3, $F_n=4{,}2\cdot10^{-4}$м^2, $F_c=25\cdot10^{-4}$м^2, $l=64\cdot10^{-3}$м, I=0,02кг·м^2, $d_x=1{,}6\cdot10^{-3}$м, $W_e=0{,}02\cdot10^{-3}$м^3, $W_o=0{,}02\cdot10^{-3}$м^3.

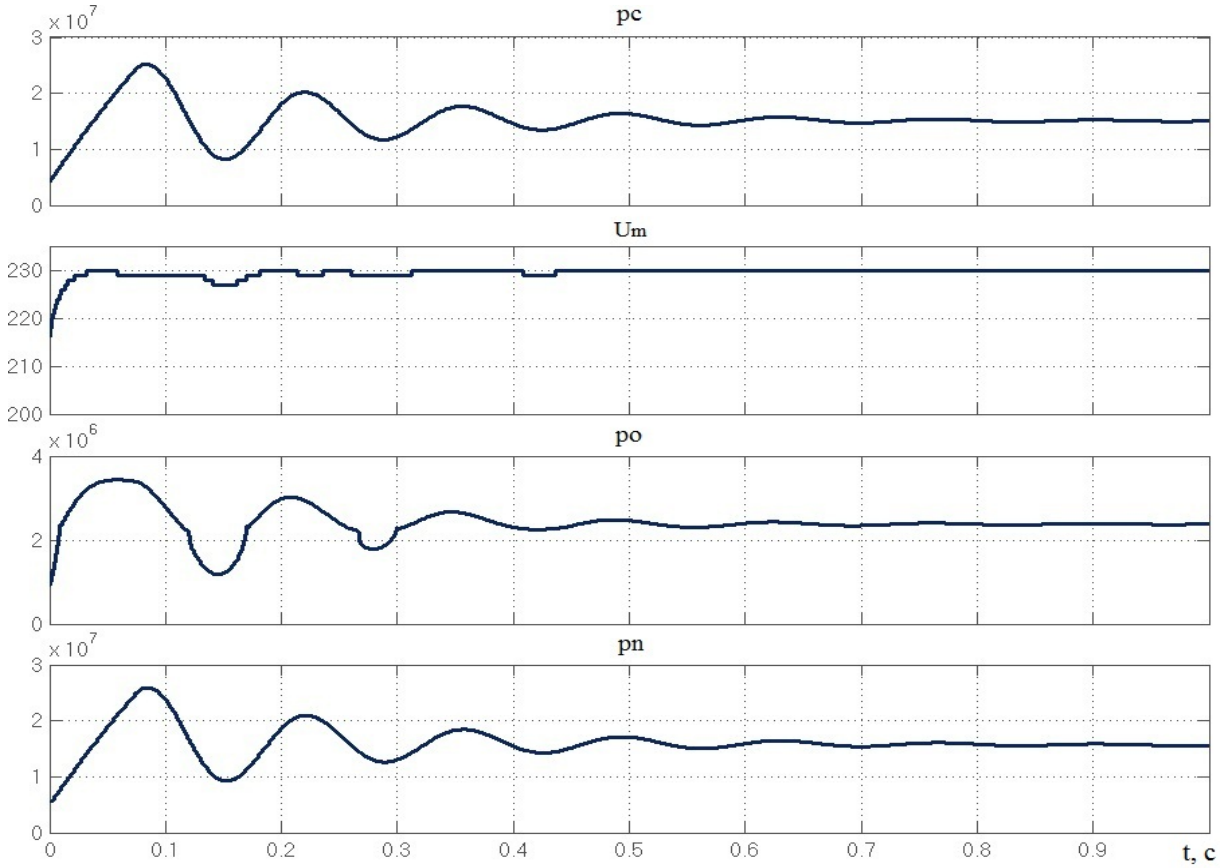


Рис. 4. Перехідний процес в гідроприводі при ступінчастій зміні навантаження

Проведені імітаційні дослідження робочих процесів в гідроприводі при ступінчастій зміні навантаження N на штоці гідроциліндра 5. При зміні навантаження від 0 до N=36000Н розраховано зміну в

часі величин тисків p_c, p_n, та p_o в гідроприводі, а також цифрового сигналу U_m (рис. 4). Моделювання перехідного процесу підтверджує роботоздатність розробленої схеми та алгоритму керування, а також дозволяє визначити статичні та динамічні характеристики гідропривода.

На статичну характеристику гідропривода (рис.2) суттєво впливає роздільна здатність k_k вхідного та вихідного блоків контролеру. Так при роздільній здатності контролера 8 Біт максимальне відхилення статичної характеристики від даних базової залежності $Q=f(N)$ становить ε_{max}=14,5%, а при роздільній здатності контролера 12 Біт максимальне відхилення статичної характеристики від данних навчальної бази суттєво зменшується і становить ε_{max} =5,3%. Похибка при формуванні статичної характеристики за рахунок контролера обумовлено втратою точності сигналу при перетворенні його з аналогової форми в цифрову і в подальшому з цифрової в аналогову форму. При високих вимогах до точності статичної характеристики слід використовувати контролери з високою (k_k >12 Біт) роздільною здатністю блоків входу та виходу.

В динамічних режимах роботи в гідроприводі виникають перехідні процеси, що мають коливальний характер на всіх режимах роботи. Найбільші значення часу регулювання $t_р$ та перерегулювання σ мають місце при максимальних значеннях навантаження N.

В процесі дослідження виявлено вплив параметрів регулятора насоса на величини $t_р$ та σ. На рис. 5 представлено вплив параметрів f_x, f_e, k_z на величину часу $t_р$. Діапазони значень параметрів регулятора насоса в процесі досліджень були такими:

$$f_x=(0{,}8\ldots4{,}0)\cdot10^{-6}\text{м}^2;\ f_e=(0{,}8\ldots4{,}0)\cdot10^{-6}\text{м}^2;\ k_z=(1{,}0\ldots7{,}0)\cdot10^{-3}\text{м}.$$

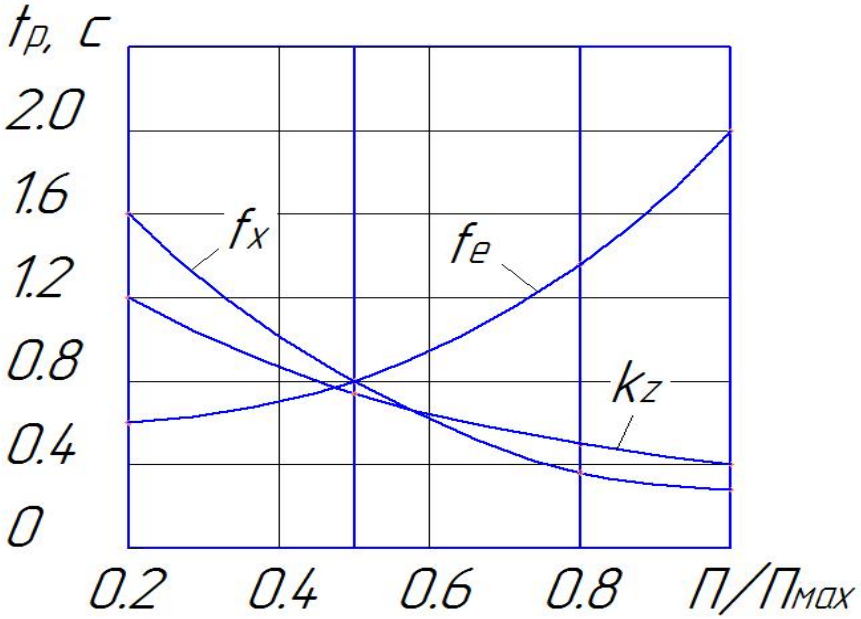


Рис. 5. Вплив параметрів регулятора насоса на час регулювання $t_р$

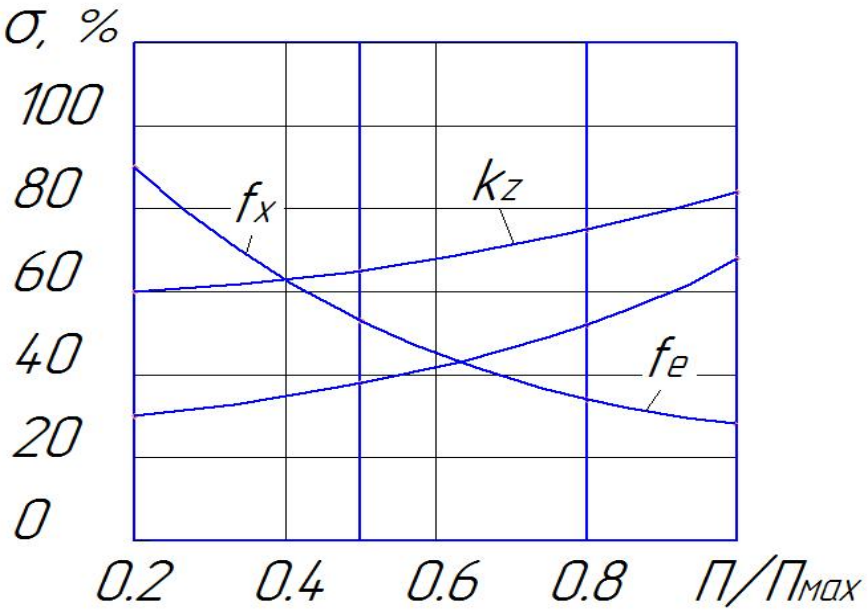


Рис. 6. Вплив параметрів регулятора насоса на час перерегулювання σ

При зміні безрозмірної величини параметра k_z від 0,2 до 1,0 час регулювання зменшується з $t_р$ =1,2с до $t_р$ =0,4с. При зміні безрозмірної величини параметра f_x з 0,2 до 1,0 час регулювання зменшується з $t_р$ =1,6с до $t_р$ =0,35с. В найбільшій мірі на час регулювання в гідроприводі впливає зміна параметра f_e. При зміні безрозмірної величини f_e з 1,0 до 0,2 час регулювання зменшується в 3,3 разу з $t_р$ =2,0с до $t_р$ =0,6с.

На рис. 6 представлено вплив параметрів регулятора насоса на величину перерегулювання σ, яка визначалась по залежності величини тиску p_n від часу. При зміні безрозмірної величини f_x з 0,2 до 1,0 величина σ зменшується з 90% до 27%. При зміні безрозмірної величини f_e з 0,2 до 1,0 величина σ зростає з 30% до 67%. Збільшення безрозмірної величини k_z з 0,3 до 1,0 приводить до збільшення σ з 60% до 84%.

При конструюванні регулятора насоса та виборі значень параметрів f_x та f_e слід орієнтуватися на менші значення f_e з діапазону f_e=(0,8…4,0)·10^{-6}м^2 та більші значення f_x з діапазону f_x=(0,8…4,0)·10^{-6}м^2, які забезпечують мінімальні значення $t_р$ та σ. Величина k_z впливає на $t_р$ та σ неоднозначно. Так збільшення k_z призводить до зменшення $t_р$ та до збільшення σ.

Вибір величини k_z повинен здійснюватись з урахуванням вимог, що висуваються до характеристик гідропривода з регульованим насосом. Найбільш ефективно такий вибір проводиться на основі методів оптимізації.

Висновки

1. Точність підтримання статичної характеристики $Q=f(N)$ в гідроприводі з контролером суттєво залежить від роздільної здатності k_k вхідних та вихідних блоків контролера. Відхилення статичної характеристики від даних із навчальної бази, що не перевищує 5% досягається при застосуванні контролера з блоками, що мають роздільну здатність k_k більше 12 Біт.

2. Для зменшення часу регулювання та перерегулювання в гідроприводі слід рекомендувати менші значення f_e з діапазону f_e=(0,8…4,0)·10^{-6}м^2 та більше значення f_x з діапазону f_x=(0,8…4,0)·10^{-6}м^2.

Література

1. Antonio Lettini, Marc Havermann, Marco Guidetti, Andrea Fornaciari. Electro-Hydraulic Load Sensing: a Contribution to Increased Efficiency Through Fluid Power on Mobile Machines // Fluidotecnica. – June 2010. – n. 345. P. 11–14.

2. Christoph Latour. Electrohydraulic Flow Matching: The next generation of load-sensing controls [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.machinedesign.com/.

3. Бородянський екскаваторний завод: офіційний web-сайт підприємства [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.borex.in.ua.

4. Иванов И. В. Развитие тракторных гидроприводов / И. В. Иванов, Д. Е. Флеер, А. Б. Халецкий // Приводная механика. – 2006. – № 12. – С. 27–37.

5. Hesse K. Components and systems for a tractor stacker and combine / K. Hesse // Bosch Rexroth Mobile Training. Elchingen. – February, 2003. – P. 18–20.

6. PVG 32. Proportional Valve: Technical Information. URL: http://www. imdl.gatech.edu.

7. Kozlov L. Energy-Saving Mechatronic Drive of the Manipulator // Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi. – 2011. – Vol. LVII (LXI), Part 3. – P. 231–238.

8. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений / И.В. Черных. – М. : Диалог, 2003. – 236 с.

Рецензія/Peer review : 20.10.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., професор, Сивак І. О.

УДК 620.66.022

Т.Я. БІЛА, В.В. СТАЦЕНКО
Київський національний університет технологій та дизайну

СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРАМИ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЕРУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В статті розглянуто принципи роботи системи керування дозатором сипких матеріалів на основі контролеру нечіткої логіки. Створено математичну модель та проведено дослідження перехідних процесів, що виникають під час роботи обладнання.

Ключові слова: дозатор, сипкі матеріали, контролер нечіткої логіки, грудкоутворення.

T.Y. BILA, V.V. STATSENKO
Kyiv National University of Technologies and Design

CONTROL SYSTEM CREATION FOR BULK MATERIALS DOSER BASED ON FUZZY LOGIC CONTROLLERS

Abstract – During the process of continuous dosing control systems design one must take into account their operational characteristics, which are caused by physical and mechanical properties and complex nature of the bulk material particles motion. The aim of the study is to develop a control system for the bulk materials doser based on the fuzzy logic controller and determine its effectiveness. Particular attention was paid to study the influence of fluctuations in the bulk material flow to the system work. Analysis of the results allows saying that the use of the control system with the fuzzy logic controller can significantly reduce the time when a transient pulse changes in the flow of particulate material as compared to a system with a PI controller. It is also found that the use of the proposed system does not require changes in the design of equipment and the proposed system can be used for modernization of the existing equipment and for creation the new ones.

Keywords: doser, bulk materials, fuzzy logic controllers, lump formation.

Вступ

Операція дозування сипких компонентів широко застосовується в технологічних процесах виготовлення сумішей на підприємствах легкої, хімічної та харчової промисловості. Виникнення відхилень масової продуктивності дозаторів від заданих значень призводить до зміни відсоткового складу суміші та, відповідно, її фізико-механічних властивостей, що, в свою чергу, знижує якість кінцевого продукту.

Роботи із розробки промислового обладнання для дозування сипких матеріалів були розпочаті в першій половині XX сторіччя, і за цей час розроблено значну кількість різноманітних конструкцій, але складний характер руху частинок значно ускладнює вирішення задачі рівномірного подання компонентів. Особливо гостро проблема постає в автоматизованих змішувальних комплексах безперервної дії [1]. В цьому випадку компоненти суміші рухаються безперервним потоком і, якщо на виході дозатора виникають пульсації в цьому потоці, то виправити їх дуже складно, оскільки частинки відразу потрапляють всередину змішувача. Основною причиною виникнення цих пульсацій є здатність сипких матеріалів до грудкоутворення. Для зменшення впливу цього ефекту застосовують розрихлювачі різноманітних конструкцій, але повністю виключити формування грудок матеріалу практично неможливо.

Проблема стає складнішою при використанні систем автоматичного керування роботою дозаторів. В цьому випадку при виникненні короткочасної зміни в об'ємній продуктивності дозатора, наприклад, через фіксацію грудки матеріалу датчиком, система почне корегувати продуктивність дозатора, що призведе до появи додаткових відхилень у потоці матеріалу. Але система керування повинна відрізняти короткочасні (імпульсні) зміни у потоці частинок від довготривалих, які можна виправити за рахунок зміни режимів роботи дозатору. Реалізація такої системи дозволить зменшити кількість суміші із відсотковим складом, що не відповідає заданому, а отже й знизити кількість неякісної продукції.

Враховуючи сучасний стан розвитку електроніки розробку системи керування в даному випадку доцільно здійснювати на базі контролерів нечіткої логіки [2]. Такі системи здійснюють роботу на основі сукупності експертних оцінок, що є безумовною перевагою, оскільки створення систем диференційних рівнянь, які б характеризували процес взаємодії частинок суміші із робочими органами дозатора, є не тривіальним завданням.

Постановка завдання

Метою роботи є розробка системи керування дозатором, яка дозволяє ігнорувати короткочасні (імпульсні) відхилення об'ємної продуктивності дозатора від заданого значення та водночас корегувати його режими роботи в інших випадках. Параметри перехідних процесів в такій системі не повинні суттєво відрізнятись від аналогічних параметрів в системах, що використовуються сьогодні. Також бажано уникнути введення до системи керування додаткових пристроїв із високою вартістю або таких, що суттєво відрізняються за масогабаритними показниками.

Результати та їх обговорення

Розглянемо структурну схему системи керування дозатором сипких матеріалів (рис. 1) [3]. До її складу входять дозатор тарілчастого типу та стрічковий транспортер із датчиком продуктивності. Частинки матеріалу подаються у вхідних патрубок дозатора (5) та потрапляють на диск (2), що обертається. Під дією відцентрових сил частинки переміщуються до краю диску, де знімаються ножем (4) та потрапляють на

стрічковий транспортер. Кількість суміші, що переміщується транспортером, визначається за допомогою датчика (8). Сигнал від датчика надходить до пристрою керування (7), який формує сигнали керування двигуном (6), з'єднаним із диском за допомогою валу (1). В роботі розглядається дозатор тарілчастого типу, оскільки його продуктивність Q(кг/с) лінійно залежить від швидкості обертання диску:

$$Q = \frac{h^2 \omega \rho}{2tg\varphi}\left[R + \left(\frac{h}{3tg\varphi}\right)\right], \quad (1)$$

де h – відстань від нижнього краю стакану (3) до поверхні диску (м);

R – радіус стакану з сипким матеріалом (м);

φ – кут природного укосу матеріалу (град);

ρ – насипна густина матеріалу (кг/м^3);

ω – швидкість обертання диску (рад/с).

Зазначимо, що запропонована система керування може бути використана із дозаторами інших типів. Але для таких умов потрібно враховувати залежність між режимами роботи їх робочих органів та продуктивністю, яка може бути нелінійною.

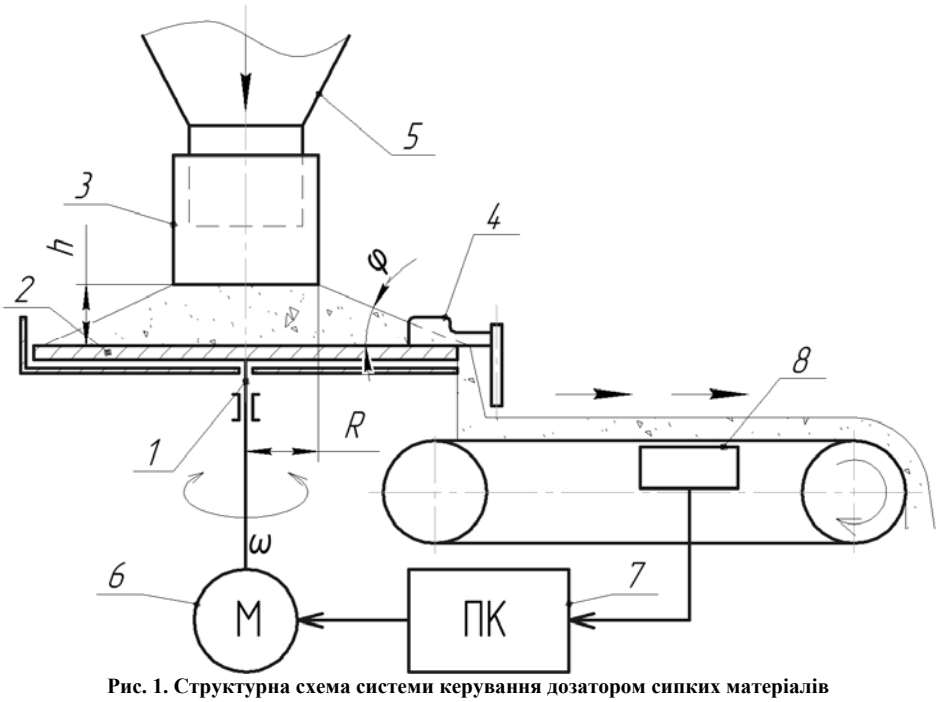
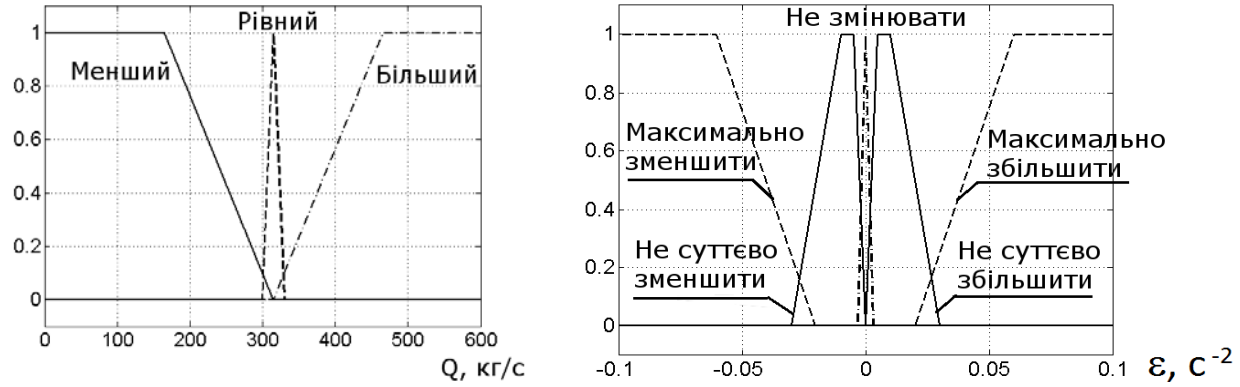


Рис. 1. Структурна схема системи керування дозатором сипких матеріалів

Для визначення можливих короткочасних (імпульсних) змін продуктивності дозатора пристрій керування аналізує одночасно два сигнали датчика $Q(t)$ та $Q(t-\tau)$, інтервал часу між якими дорівнює τ.Час τ обирається залежно від конструкції конкретного дозатора та інформації про можливі розміри грудок сипкого матеріалу, що можуть утворюватися під час його роботи. Ці два сигнали датчиків вказують на змінювання потоку матеріалу у часі. В теорії, можна зробити більшу кількість вимірів, що дозволить однозначно виявити імпульсні зміни у потоці матеріалу. Але тоді при виникненні довготривалих змін, система почне реагувати із затримкою, яка дорівнюватиме часу необхідному для проведення всіх вимірювань, що призведе до збільшення кількості неякісної суміші. Принцип керування, що запропонований у даній роботі, передбачає попередню оцінку змін у потоці матеріалу на основі двох сигналів датчиків. Якщо фіксується відхилення від заданого значення, система робить припущення про необхідність корегування продуктивності дозатора і починає змінювати швидкість обертання диску з низьким прискоренням. У випадку, якщо наступні сигнали датчику підтверджують необхідність корегування продуктивності, контролер збільшує прискорення диску. Це надає можливість зберегти меншу тривалість перехідних процесів при корегуванні режимів роботи дозатору. Якщо наступні сигнали датчиків свідчать, що має місце короткочасна зміна продуктивності, то контролер повертає швидкість обертання диску до попереднього значення.

Відповідно до теорії нечітких множин, кожен з сигналів $Q(t)$ та $Q(t-\tau)$опишемо за допомогою лінгвістичної змінної «Сигнал датчика», яка в свою чергу визначатиметься за допомогою трьох термів: «більший», «менший» та «рівний» заданому значенню. Для реалізації лінгвістичних змінних визначимо точні значення термів. Кожному значенню з діапазону можливих значень сигналу датчику може бути поставлене у відповідність деяке число від 0 до 1, що визначає ступінь приналежності даного значення сигналу датчику до того чи іншого терму лінгвістичної змінної. Наприклад, для терму «більший» значення 1 означає, що всі експерти вважають поточний сигнал більшим за заданий, а значення 0 – навпаки. З фізичної точки зору сигнал датчика визначається кількістю матеріалу, який знаходиться в даний момент часу на стрічці транспортера, тобто є пропорційним масовій продуктивності дозатора.

Графічно функції приналежності сигналів датчику наведені на рис. 2,а.



а) **б)**

Рис. 2. Функції приналежності для змінних«Сигнал датчику» (а) та «Прискорення» (б).

Для вихідного сигналу також вводимо лінгвістичну змінну «Прискорення», що характеризується п'ятьма термами: «Не змінювати», «Максимально зменшити», «Не суттєво зменшити», «Максимально збільшити», «Не суттєво збільшити». Кожен з термів визначає величину прискорення диску дозатора. Функції приналежності змінної «Прискорення» наведені на рис. 2,б.

Наступним кроком налаштування контролеру нечіткої логіки є встановлення взаємозв'язку між вхідними та вихідними сигналами. Ця залежність наведена в таблиці.

Таблиця

Залежності між вхідними та вихідними сигналами

Сигнал датчику *Q(t)*	**Сигнал датчику *Q(t-τ)***	**Прискорення**
Рівний	Рівний	Не змінювати
Рівний	Менший	Не суттєво зменшити
Рівний	Більший	Не суттєво збільшити
Менший	Рівний	Не суттєво збільшити
Менший	Менший	Максимально збільшити
Менший	Більший	Не суттєво збільшити
Більший	Рівний	Не суттєво зменшити
Більший	Менший	Не суттєво зменшити
Більший	Більший	Максимально зменшити

Якщо сигнали датчиків відповідають заданим, контролер не змінює швидкість обертання диску. Коли система фіксує зміну продуктивності дозатора, тобто один з сигналів датчика відрізняється від заданого, контролер починає повільно збільшувати або зменшувати швидкість обертання диску. Далі можливі два випадки.

1) Зміна сигналу датчика була зумовлена появою грудки матеріалу і при наступному вимірюванні сигнал датчика дорівнюватиме заданому значенню. В цьому випадку швидкість обертання диску повернеться до попереднього значення і тривалість перехідних процесів буде мінімальною, оскільки зміна швидкості обертання відбувалась із незначним прискоренням.

2) Зміна сигналу датчика має довготривалий характер і спричинена, наприклад, зміною куту природного укосу матеріалу, що виникла через зміну вологості. В цьому випадку при наступному вимірюванні сигнал датчика буде відрізнятись від заданого і система почне змінювати швидкість обертання диску із максимальним прискоренням. Процес продовжуватиметься до тих пір, доки сигнали датчику знов не стануть дорівнювати заданим.

Для визначення ефективності застосування системи, що запропонована, створена її математична модель[4] та проведено дослідження перехідних процесів для довготривалих і короткочасних змін продуктивності дозатора. Паралельно проведено порівняння її роботи із «класичною» системою керування з ПІ-регулятором. Результати моделювання наведено на рис. 3 та 4.

В обох випадках заданий рівень продуктивності дозатора становив 315 кг/год. На рис. 3 показані результати моделювання при виникненні зовнішнього впливу, який миттєво змінив продуктивність дозатора з 315 до 415 кг/год. Реакція систем з ПІ-регулятором та контролером нечіткої логіки наведена на рис. 3,б та 3,в, відповідно. В цьому випадку система з контролером нечіткої логіки має на 18% більшу тривалість перехідного процесу у порівнянні із системою з ПІ-регулятором.

При моделюванні імпульсної зміни продуктивності враховано, що при формуванні грудки сипкого матеріалу відбувається зменшення потоку та, відповідно, зниження сигналу датчика. Коли грудка потрапляє на стрічку транспортера відбувається стрибкове збільшення сигналу датчика. Зміна цього сигналу показана на рис.4,а. Реакції систем з ПІ-регулятором та контролером нечіткої логіки на такий сигнал наведені на рис.4,б та 4,в, відповідно. Аналіз цих перехідних процесів свідчить, що використання системи з

контролером нечіткої логіки дозволяє скоротити тривалість перехідного процесу на 41%.

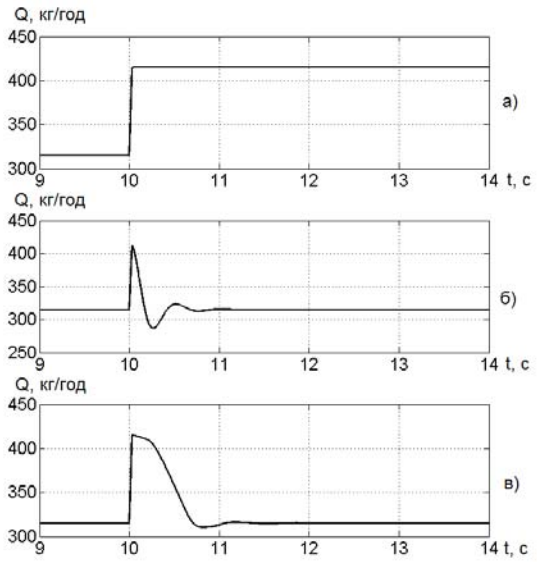


Рис. 3. Результати моделювання при стрибковій зміні сигналу датчика

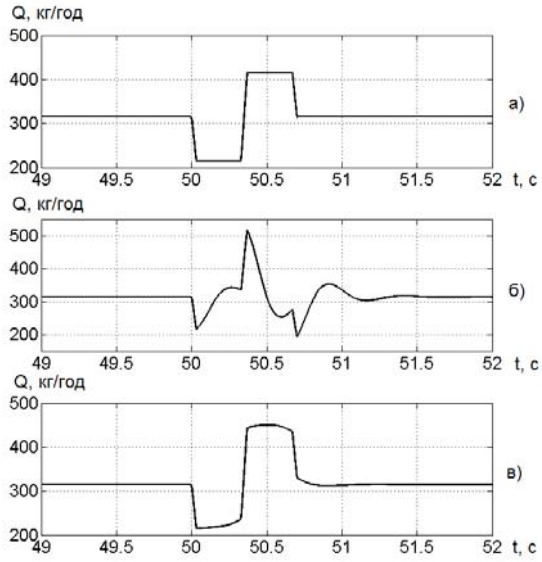


Рис. 4. Результати моделювання при імпульсній зміні сигналу датчика

Висновки

Виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати, що:

1) Використання контролерів нечіткої логіки при створенні систем керування враховує специфіку роботи обладнання для дозування сипких матеріалів.

2) Система, що запропонована в роботі, дозволяє знизити тривалість перехідних процесів у випадку короткочасної зміни продуктивності дозатора на 41% та, відповідно, зменшити об'єм неякісної суміші.

3) Структура системи керування з контролером нечіткої логіки не відрізняється від «класичних» систем та, враховуючи відносно низькі ціни на контролери, практично не збільшує загальної вартості обладнання.

Література

1. Стаценко В.В. Аналіз сучасних методів контролю якості процесу змішування багатокомпонентних середовищ / В.В. Стаценко, Т.Я. Біла // Вісник КНУТД. – 2004. – № 1. – С. 80–84.

2. Новак В. Математические принципы нечёткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкрож // Mathematical Principles o fFuzzy Logic. — Физматлит, 2006. — 352 с.

3. Біла Т.Я. Моделювання автоматизованої системи керування приводом тарілчастого дозатора сипких матеріалів / Т.Я. Біла, В.В. Стаценко // Вісник КНУТД. – 2010. – № 5. – С. 27–32.

4. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия — Телеком, 2007. – 288 с.

Рецензія/Peer review : 4.9.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Петко І.В.

УДК 006.072.025:658.563

Ю.О. ДЕНИСЕНКО, В.О. ЗАЛОГА, О.В. ІВЧЕНКО, О.П. МАСЛОВ
Сумський державний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ПЕРЕБІГУ ЇЇ ПРОЦЕСІВ

В цій статті для підвищення ефективності інформаційної системи управління якістю інструментальної підготовки виробництва авторами запропонована математична модель прийняття рішень, що заснована на визначенні раціональної стратегії протікання процесів. Ця модель має універсальний характер та базується на застосуванні теорій оптимізації на графі та марківських ланцюгів.

Ключові слова: інструментальна підготовка, модель, оптимізація, техніко-економічні показники.

Y.O. DENYSENKO, V.O. ZALOHA, O.V. IVCHENKO, O.P. MASLOV
Sumy State University

INCREASE QUALITY OF TOOL PREPARATION BASED ON DEFINITIONS RATIONAL STRATEGY OF ITS PROCESSES

Abstract – The aim of this article is to improve the efficiency of information quality management system of tool preparation by implementing a mathematical model of rational decision-making processes of quality management based on sustainable development factor

Nowadays ensure of multiple modern engineering enterprises competitiveness is impossible without the introduction of information technology. The most common management system is AutoTAS, TIM LEITZ, eTMS Tadcon, GTMS and others. They examine tools and industrial equipment as a resource. It is not possible to establish the future prospects of production of tools, to evaluating its effectiveness and efficiency; identify the ratio and interaction of various factors engineering and economics that affect it and etc. Therefore, the paper presents a mathematical model to adopt a decision as pre-production tool based on the analysis and assessment of technical and economic indicators. This model is universal and based on the use of optimization theories on the graph and Markov chains. The model increases the validity and efficiency of decision-making. Using the model minimizes the cost of tool preparation production.

Keywords: tool preparation, model, optimization, technical and economic indicators.

Інструментальна підготовка виробництва (далі – ІПВ) багатономенклатурного машинобудівного підприємства являє собою сукупність взаємопов'язаних процесів, що існують для досягнення однієї мети – забезпечення основного виробництва якісним інструментом й оснащенням точно в строк. Аналіз світового та вітчизняного досвіду свідчить, що якість процесів ІПВ має вагомий вплив не тільки на ефективність основного виробництва, а й на конкурентоспроможність підприємства в цілому [1, 2]. Одним з основних шляхів підвищення якості ІПВ є впровадження сучасних інформаційних технологій, наприклад, AutoTAS, TIM LEITZ, eTMS Tadcon, GTMS та ін. [3–5], основою яких є використання підходу «Tool Management» щодо ефективного управління, але питанням формування інформаційної системи (далі ІС) ІПВ вони відводять другорядну роль, що не забезпечує, в повній мірі, інформаційну взаємодію між рівнями управління. Як правило, інструмент (оснащення) в цих системах виступає в якості ресурсу для вирішення конкретного виробничого завдання але, зовсім, не аналізується як керований учасник технологічного процесу.

Тому **метою цієї роботи** є підвищення ефективності інформаційної системи управління якістю інструментальної підготовки виробництва шляхом впровадження математичної моделі прийняття раціональних рішень щодо управління якістю її процесів на основі застосування коефіцієнта сталого розвитку.

Створення системи техніко-економічних показників (далі – ТЕП) ІС ІПВ [6] є одним із інструментів представлення, конкретизації та реалізації життєвого циклу інструменту, оснащення та пристосувань (далі ТО). Це надає можливість: наочно показати реальну картину та подальші перспективи розвитку ІС ІПВ; провести оцінювання її ефективності та результативності; виявити взаємозв'язок і взаємодії різних факторів техніки та економіки, які впливають на неї; визначити резерви виробництва інструменту й оснащення; опрацювати заходи щодо раціоналізації використання ТО та ресурсів для їх виготовлення та ін.

Інформація, що отримується про ТЕП ІС ІПВ є тою основою, що дозволить прийняти стратегічно важливі для керівництва рішення в сфері якості. В той же час ця інформація повинна мати упорядкований, зрозумілий та зручний вигляд особи, що приймає рішення. Особливо важливим є вибір найбільш прийнятного методу аналізу й оцінювання ТЕП ІС ІПВ. Вибір того або іншого методу залежить від: того, наскільки чітко й коректно поставлені цілі; виду інформації, яку необхідно одержати, та її точності й оперативності.

Одним із шляхів вирішення проблеми щодо аналізу й оцінювання ТЕП ІС ІПВ є створення математичної моделі щодо прийняття рішення стосовно ІПВ машинобудівного підприємства. Ця модель повинна базуватися на основі процесного й системного підходів та забезпечувати виконання принципу міжнародних стандартів ISO серії 9000 – «прийняття рішень на основі фактів».

Процес прийняття рішень реалізується на основі наступних рекомендацій: 1) визначення цілей та завдань ІС ІПВ; 2) врахування питань, що пов’язані не тільки з отриманням якісного ТО, а й іншими процесами ІС ІПВ; 3) орієнтація на вимоги основного виробництва; 4) визначення всіх необхідних ТЕП, що

забезпечать раціональний життєвий цикл ТО; 5) встановлення цільової функції та прийняття рішень на основі визначення раціональної гілки ЖЦ ТО.

З метою виконання цих вимог в роботі запропонована математична модель визначення раціональної стратегії ІПВ, алгоритм реалізації якої представлено на рис. 1, що базується на застосуванні методу оптимізації на графі та теорії марківських ланцюгів. Слід зазначити, що представлена в цій статті модель дозволяє обрати раціональну стратегію ІПВ, але не виключає можливості прийняття іншого остаточного рішення особою, що його приймає.

У блоці 1, запропонованого алгоритму реалізації моделі, формується банк даних, необхідних для побудови моделі, а також проводиться аналіз станів процесів ІС ІПВ. Хоч сучасні інформаційні системи і дозволяють оперативно обробляти інформацію достатньо великих обсягів, разом з тим, у реальних умовах з метою зменшення часу на прийняття раціонального рішення необхідно намагатися (на скільки це є можливим) скорочувати (зменшувати) масиви даних. Бажання відобразити повну схему процесів ІС ІПВ може призвести до отримання дуже деталізованої інформації, що може бути не дуже значимою, але суттєво збільшить час, потрібний на її обробку, систематизацію тощо. Більшість таких систем можуть виявитися неефективними, тому модель управління ІС ІПВ повинна буди агрегованою. Під агрегуванням розуміють заміну опису сукупності процесів описом процесу, який відображає зміст заміненої сукупності процесів та включає істотні характеристики цієї сукупності.

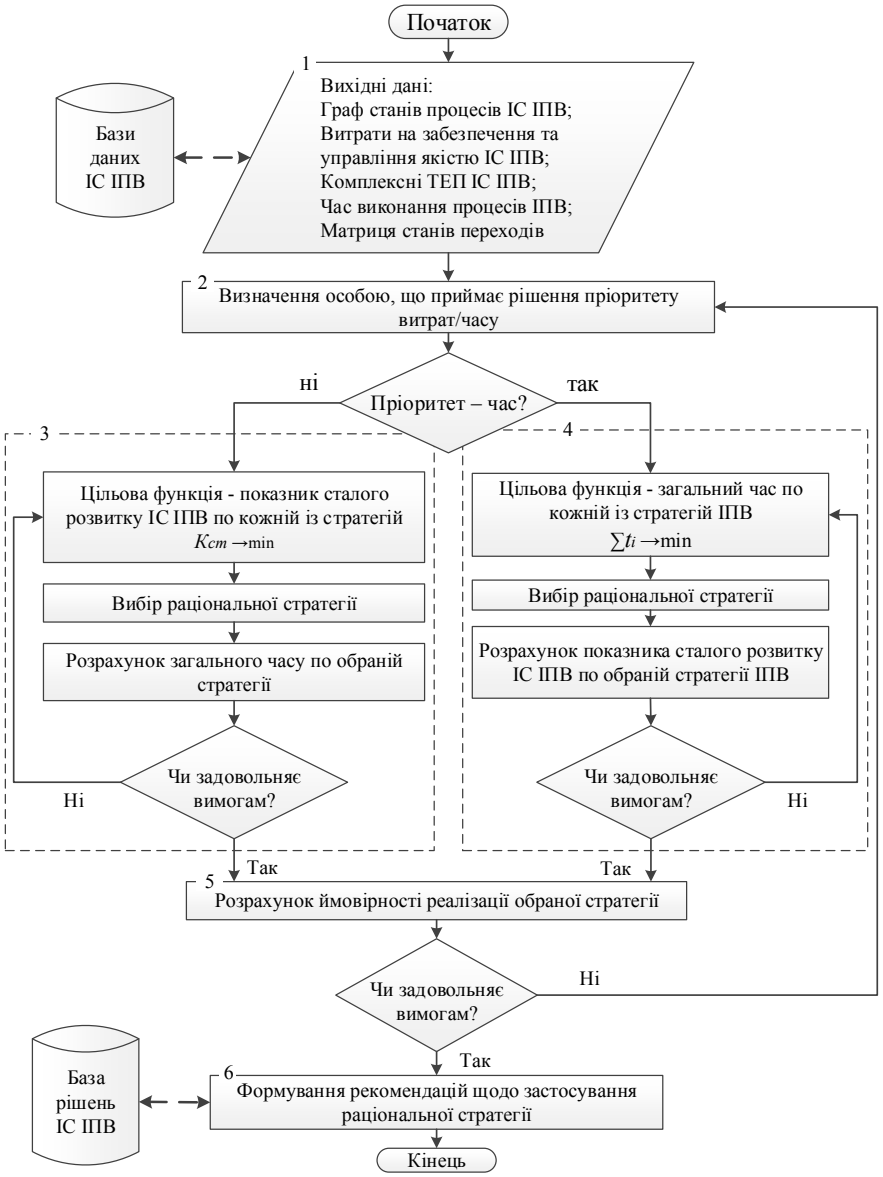


Рис. 1. Алгоритм реалізації математичної моделі щодо прийняття рішень в інформаційної системи управління якістю інструментальної підготовки виробництва

Беручи до уваги це зауваження, модель управління ІС ІПВ, що наведена на рис. 1, можна представити у вигляді орієнтованого графу *G (S, t)*, де *S* – впорядковані пари вершин, а *t* це дуги, що їх з'єднують (рис. 2).

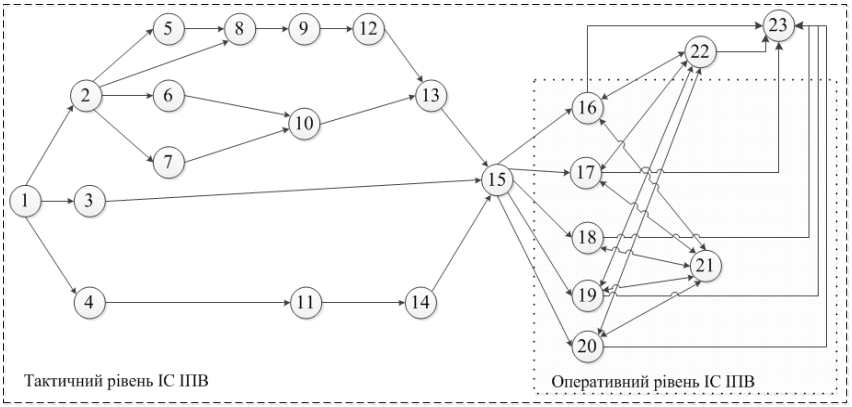


Рис. 2. Граф станів процесів ІС ІПВ

На рисунку 2: 1 – виявлення потреб в ТО, її уніфікації та нормативному забезпеченні; 2 – прийняття рішення щодо виготовлення, модернізації ТО чи використання збірного ТО; 3 – прийняття рішення щодо використання ТО, що є в наявності; 4 – прийняття рішення щодо закупівлі уніфікованого ТО; 5 – розроблення проекту на виготовлення ТО; 6 – розроблення проекту на модернізацію ТО; 7 – розроблення проекту на складання ТО; 8 – підготовка плану випуску ТО; 9 – закупівля матеріалів; 10 – закупівля комплектуючих; 11– закупівля ТО; 12 – виготовлення ТО; 13 – приймально-здавальні випробування ТО; 14 – приймальні випробування ТО; 15 – зберігання ТО; 16 – прокат виготовленого ТО; 17 – прокат модернізованого ТО; 18 – прокат збірного ТО; 19 – прокат ТО, що є в наявності; 20 – прокат придбаного ТО; 21 – централізоване заточування інструменту; 22 – ремонт ТО; 23 – утилізація ТО.

Одна з вагомих переваг сучасних інформаційних систем полягає в створенні єдиного інформаційного простору, що значно спрощує обмін інформацією, а також збір необхідних даних. Крім того, системи управління, що базуються на принципах CALS-технологій дозволяють створювати відносно великі масиви вихідних даних в найкоротші строки. Вихідними даними для прийняття раціонального рішення щодо процесів ІС ІПВ є плановані значення витрат на забезпечення та управління якістю ІС ІПВ (на основі застосування методів прогнозування) та комплексних ТЕП ІС ІПВ (представлених в балах) [7], прогнозний час виконання процесів ІС ІПВ, а також матриця переходів станів процесів ІС ІПВ.

У блоці 2 практично реалізується запропонована процедура визначення особою, що приймає рішення, пріоритету «витрати / час» щодо виготовлення нового та модернізації наявного ТО, використання збірного ТО тощо.

За результатами аналізу діяльності вітчизняних та зарубіжних машинобудівних підприємств встановлено, що прийняття рішень стосовно ІПВ засноване, як правило, на виконанні двох найбільш розповсюджених умов: 1) виконання діяльності з мінімальними витратами (найбільш розповсюджена умова); 2) мінімізація часу виконання встановлених задач для ІПВ.

З огляду на отриманні результати запропоновано процес прийняття рішень щодо вибору раціональної стратегії з ІПВ розділити на дві окремі ланки, що представлені у вигляді блоків 3 та 4 на рис. 1.

У блоці практично 3 реалізується стратегія виконання діяльності з мінімальними витратами при забезпеченні необхідного рівня ТЕП ІС ІПВ, інакше кажучи – реалізується стратегія забезпечення сталого розвитку ІС ІПВ. Зазвичай на підприємствах процес планування випуску продукції є чітко відбудованим, тому вже заздалегідь відомим є графік забезпечення ТО відповідних робочих місць. В такому випадку функція часу при здійсненні ІПВ є пріоритетною і має обмежувальний характер.

Взагалі сталий розвиток – це концепція керованого розвитку, яка поєднує в собі три складові: економічну, екологічну і соціальну [8–10]. Всі три елементи повинні розглядатися збалансовано, тому основним завданням є їх узгодження.

В даному випадку запропонована цільова функція оптимізації – функція визначення коефіцієнта сталого розвитку ІС ІПВ (Кст)

$$\text{Кст} = Q_я \cdot \sum_{i=1}^{n} \sqrt[6]{\left(\frac{\text{В}_б}{\sum_{j=1}^{m} B_j} \right)^{\gamma_1} \cdot K_{oj}^{\gamma_2} \cdot K_{вj}^{\gamma_3} \cdot K_{яj}^{\gamma_4} \cdot K_{ej}^{\gamma_5} \cdot K_{cj}^{\gamma_6}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $Q_я$ – показник якості процесу ІС ІПВ;

B_j – витрати на якість процесів ІС ІПВ;

$\text{В}_б$ – базовий показник витрат на якість процесів ІС ІПВ;

K_o, $K_в$, $K_я$, $K_е$, $K_с$ – відповідно організаційно-технічний, виробничий, якості процесів ІС ІПВ, екологічний та соціальний комплексні ТЕП, які розраховуються для кожного процесу життєвого циклу ІС ІПВ;

γ_1 – γ_6 – коефіцієнти вагомості комплексних ТЕП відповідно: організаційно-технічного,

виробничого, якості процесів ІС ІПВ, екологічного та соціального.

Використання показника якості процесу ІС ІПВ дозволяє виключити шлях, якість процесів якого не задовольняє вимогам особи, що приймає рішення. Якщо рівень якості процесу ІС ІПВ задовольняє вимогам, то приймається $Q_я = 1$, якщо не задовольняє, то $Q_я = 0$.

Витрати на якість процесів ІС ІПВ, визначаються окремо для конкретного підприємства з урахуванням його техніко-економічного стану та ін. факторів економіки. Також, в залежності від часу, в який визначаються витрати на якість, вони можуть бути прогнозними чи розрахованими.

Необхідно також відмітити, що витрати на процес життєвого циклу ТО приймаються на відповідну одиницю ТО, тобто плановані витрати на якість процесів ІС ІПВ розраховуються за формулою:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{m} (B_{з_i} + B_{y_i})}{K_{TO}}, \tag{2}$$

де $B_{з_i}$ – плановані витрати на забезпечення якості процесу ІС ІПВ;

B_{y_i} – плановані витрати на управління якістю процесу ІС ІПВ;

m – кількість статей калькуляції витрат на якість процесу ІС ІПВ;

K_{TO} – кількість тих ТО, щодо процесу ЖЦ яких приймаються рішення.

Необхідно зауважити, що у при реалізації ІС ІПВ є процеси, які на тактичному рівні несуть за собою витрати, що мають негативну цінність, а на оперативному рівні, – навпаки. Наприклад, процес переточування інструменту чи ремонту ТО несе за собою додаткові витрати на якість, разом з тим, збільшення кількості переточувань підвищується цінність інструменту, бо збільшується строк окупності витрат, які закладені в виготовлення чи придбання ТО (інструменту), за рахунок збільшення строку служби. Тому для оперативного рівня ІПВ пропонується відносити витрати на якість процесів ІПВ до кількості ремонтів чи переточувань, тобто пропонується використовувати відносні показники якості.

Коефіцієнти вагомості комплексних ТЕП пропонується визначати з застосуванням кваліметричного підходу експертним шляхом для конкретного підприємства.

Обмежуючими умовами при виконанні ***блоку 3*** виступають:

а) можливість постачання ТО для основного виробництва точно у встановлені строки:

$$\sum_{j=1}^{n} t_j \le T, \tag{3}$$

де t_j – час виконання j-го процесу; T – загальний час на забезпечення ТО основного виробництва.

б) виконання вимог кваліметрії за всіма коефіцієнтами вагомості [1]:

$$\sum_{k=1}^{6} \gamma_k = 1. \tag{4}$$

У блоці 4 реалізується стратегія мінімізації часу виконання встановлених в ІС ІПВ задач. Це пояснюється виникненням ситуації, коли час на постачання ТО на робочі місця лімітований з причин запуску незапланованої партії чи неврахування факторів, які можуть вплинути на наявність необхідного ТО в резервному запасі. В цьому разі обирається стратегія, в якій задані жорсткі часові рамки не спричинять перевитрат чи різкого погіршення ТЕП основного виробництва.

При виконанні цієї стратегії в основі прийняття рішення пропонується цільова функція оптимізації часу виконання відповідних процесів ІПВ:

$$\sum_{j=1}^{n} t_j = T \to \min. \tag{5}$$

У цьому випадку обмежуючими умовами будуть:

$$K_{cm} \to \min \text{ та } \sum_{k=1}^{6} \gamma_k = 1.$$

У блоці 5 передбачається обчислення ймовірності реалізації обраної стратегії шляхом застосування теорії марківських ланцюгів [12, 13]. Якщо значення розрахованої ймовірності менше рівня, який задовольняє особу, що приймає рішення, в такому разі необхідно розглянути альтернативні стратегії перебігу процесів ІС ІПВ.

У блоці 6 на основі отриманої з блоків 3, 4 та 5 інформації, особа, що приймає рішення, обирає най раціональнішу стратегію розвитку процесів ІС ІПВ.

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

1. В наш час забезпечення конкурентоспроможності сучасних машинобудівних підприємств, а саме, підприємств з багатономенклатурною, малосерійною складовою продукції є неможливим без впровадження

інформаційних технологій. Найбільш розповсюджені програмні продукти: AutoTAS, TIM LEITZ, eTMS Tadcon, GTMS та ін. розглядають ТО лише як ресурс, що не дозволяє встановити подальші перспективи розвитку ІС ІПВ; провести оцінювання її ефективності та результативності; виявити взаємозв'язок і взаємодії різних факторів техніки та економіки, що на неї впливають; визначити резерви виробництва інструменту й оснащення; опрацювати заходи щодо раціоналізації використання ТО та ресурсів для його виготовлення та ін.

2. В роботі для вирішення проблеми щодо аналізу й оцінювання ТЕП ІС ІПВ запропонована математична модель щодо прийняття рішення стосовно ІПВ машинобудівного підприємства. Модель базується на визначенні раціональної стратегії протікання процесів ІС ІПВ машинобудівного підприємства та використанні теорій оптимізації на графі й марківських ланцюгів.

3. Запропонована модель прийняття рішень в ІС ІПВ значно спрощує процес розповсюдження інформації та підвищує обґрунтованість ухвалення оперативних управлінських рішень, що дозволяє мінімізувати витрати на ІС ІПВ.

4. Вперше для прийняття рішення стосовно вибору раціонального шляху перебігу процесів ІПВ запропоновано застосовувати коефіцієнт сталого розвитку ІС ІПВ, який враховує виконання вимог міжнародних стандартів на системи управління (ISO 9001, OHSAS 18001 і т.д.) та дозволяє підвищити рівень обґрунтованості прийнятих рішень.

Література

1. Новицкий Н. И. Организация производства на предприятиях : учеб.-метод. пособие / Н. И. Новицкий. – М. : Финансы и статистика, 2001. – 391 с.

2. Агарков А. П. Эффективная организация и управление инструментальным хозяйством предприятия / А. П. Агарков, Б. А. Аникин. – М. : Экономика, 1981. – 128 с.

3. Tool Management System Complements DNC [Електронний ресурс] // Modern Machine Shop. – Режим доступу : http://www.mmsonline.com/articles/tool-management-system-complements-dnc

4. Enterprise Tool Management Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.tadcon.com/eTMS%20solution.htm

5. TIM Tool Information Management [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.hoechsmann.com/lexikon/19393/TIM_Tool_Information_Management_.html

6. Залога В.О. Система техніко-економічних показників інструментальної підготовки виробництва / В.О. Залога, Ю.О. Денисенко, О.В. Івченко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С. 79 – 89.

7. Залога В.О. Нормалізація техніко-економічних показників інструментального виробництва на основі застосування теорії нечітких множин / В.О. Залога, Ю.О. Денисенко, О.В. Івченко, О.Д. Динник // Наукові нотатки : міжвузівський збірник. – Луцьк : ЛНТУ, 2015. – Вип. 48. – С. 78 – 85.

8. Сталий розвиток [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://uk.wikipedia.org/wiki/Сталий_розвиток

9. Садовенко А. Сталий розвиток суспільства: навчальний посібник / А. Садовенко, Л. Масловська, В. Середа, Т. Тимочко. – 2-е вид. – К., 2011. – 392 с.

10. Понедельников В. В. Инвестиционное обеспечение устойчивого развития аграрного производства : дис. … канд. экон. наук : 08.00.05 / В. В. Понедельников. – М. : РГБ, 2006. – 210 с.

11. Щипин К. С. Система прогнозирования на основе многокритериального анализа временных рядов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах / К. С. Щипин. – М. : МГТУ, 2004. – 135 с.

12. Вайсман В. О. Моделі, методи та механізми створення і функціонування проектно-керованої організації : [монографія] / В. О. Вайсман. – К. : Науковий світ, 2009. – 146 с.

13. Гогунский В.Д. Марковская модель портфеля проектов / В.Д. Гогунский, А. В. Оганов // Автоматизация: проблемы, идеи, решения : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь : СевНТУ, 2014. – С. 109–111.

Рецензія/Peer review : 4.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф., Дядюра К.О.

УДК 65.011-:577.23(477.43)

Г.С. КАЛДА, Н.О. СЬОМАК
Хмельницький національний університет

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОЕНЕРГЕТИКИ В ХМЕЛЬНИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ

В статті обґрунтовано необхідність формування та розвитку біоенергетики в Хмельницькій області для підвищення рівня енергетичної безпеки. Порушено питання скорочення споживання природного газу та розвитку енергозберігаючих технологій. Проаналізовано економічну доцільність використання твердота-ливних котлів та наведено порівняння витрат коштів на опалювальний сезон за видами палива.

Ключові слова: біоенергетика, твердопаливний котел, тверде паливо, енергозберігаючі технології.

H.S. KALDA, N.O. SOMAK
Khmelnytsky National University

EFFICIENCY AND PERSPECTIVES OF BIOENERGY IN KHMELNITSKY REGION

Abstract – In the article the necessity of formation and development of bioenergy in the Khmelnytsky region to improve energy security. Violated the reduction of natural gas and development of energy efficient technologies. Analyzed the economic feasibility of using solid fuel boilers and drink are comparing spending on heating season for fuels.

Keywords: bioenergy, solid fuel boiler, solid fuel, energy-saving technology.

Вступ

Україна щорічно споживає близько 180–210 млн тонн умовного палива, паливно-енергетичних ресурсів і належить до енергозалежних країн. Така структура породжує залежність економіки України від країн-експортерів і є загрозливою для її енергетичної і національної безпеки.

Рівень використання відновлюваних джерел енергії, серед яких перше місце посідає біомаса, в Україні значно відстає від розвинених країн. На сьогодні біомаса – це четверте за значенням паливо у світі, яке забезпечує близько 2 млрд т в рік, або 14 % загального споживання первинних енергоносіїв. Зарубіжний досвід свідчить, що частка біомаси в загальному споживанні первинних енергоносіїв становить 3 % – США, 12 % –Австрії, 18 % – Швеції, 23 % – Фінляндії [1].

Забезпеченість пальним галузей різних видів діяльності, які його споживають, є важливим фактором їх розвитку та функціонування. Забезпеченість необхідною кількістю пального залежить від ціни на традиційні його види, зростання якої стало причиною кризової ситуації у паливному комплексі. Тому частково задовольнити потреби всіх споживачів пальним можна за рахунок виробництва альтернативних його видів. Але для розвитку виробництва біопалива необхідна наявність ефективно сформованої сировинної бази. Сільське господарство є основним споживачем традиційних видів пального (дизельного та бензину моторного) і одночасно може стати потужним джерелом сировини для виробників біопалива [3].

Вибір сільськогосподарських культур, які формують сировинну базу для виробництва біопалива ґрунтується, в першу чергу, на кліматичних та ґрунтових умовах зони. У дослідженнях під сировиною для виробництва біопалива у Хмельницькій області слід розглядати насіння ріпаку та зерно кукурудзи.

Високі ціни при реалізації насіння ріпаку і зростання світового виробництва біодизелю сприяли збільшенню посівних площ ріпаку. Високий вихід біоетанолу з 1 т кукурудзи та найвища урожайність її серед інших зернових культур характеризують кукурудзу на зерно як перспективну енергетичну культуру. Слід відмітити, що ріпак і кукурудза як сировина для біопалива щорічно відновлюються, що не створить загрози вичерпування на відміну від джерел сировини для традиційного пального [2].

Економічна доцільність використання біоенергетики в Хмельницькій області

В світлі останніх подій, пов'язаних з початком світової економічної кризи, для України виник ряд питань, які потребують нагального вирішення, найбільш актуальними з них є скорочення споживання природного газу та розвиток енергозберігаючих технологій.

Аналізуючи проблеми з газопостачанням, що виникли в Україні наприкінці 2008 року, ще раз показали актуальність розвитку альтернативної енергетики для України. Серед всіх альтернативних видів палива, що відомі на даний момент, одним з найбільш перспективних напрямків для використання в Україні є енергія біомаси.

Потенціал рослинної сільськогосподарської біомаси у Хмельницькій області становить:

- злакових – 4300 млн кВт год/рік;
- зернобобових культур – 1480 млн кВт год/рік;
- соняшника – 6 млн кВт год/рік;
- кукурудзи – 2490 млн кВт год/рік;
- овочі відкритого і закритого ґрунтів – 330 млн кВт год/рік.

Як приклад, ТОВ «Хмельницький комбінат хлібопродуктів» для виробництва тепла і сушки своєї продукції використовує відходи виробництва круп. Використання гречаної лузги до 5 тис.тонн/рік дало можливість підприємству відмовитись від традиційного палива – природного газу.

У рамках цільових екологічних (зелених) інвестицій планується здійснити технічне переоснащення

котелень загальноосвітніх навчальних закладів області (22 об'єкти) на спалювання деревини в котлах газогенераторного (піролізного) типу, що дозволить умовно зменшити споживання природного газу до 1,5 млн м^3 [4].

В сучасних економічних умовах твердопаливні котли стають все більш популярні:

1. Завдяки вдосконаленню технологій по надійності і ефективності спалювання вони не поступаються газовим котлам.

2. Автоматичний контроль горіння робить простим і зручним використання котла в сучасних системах опалення.

3. Герметичність завантажувальних і ревізійних люків перешкоджає задимленості приміщення, де встановлений котел.

4. Високотемпературне спалювання робить процес горіння максимально ефективним, забезпечуючи повне згорання палива.

5. Переклад існуючих котелень, що працюють на газу, на твердопаливні котли не вимагає будівництва нових котелень. Досить забезпечити місце зберігання альтернативного палива.

6. При реконструкції існуючих котелень, нові твердопаливні котли встановлюються паралельно з газовими і існуюча схема підготовки води можлива для застосування нових котлів.

Державним Красилівським агрегатним заводом здійснюється виробництво котлів, які працюють на твердому паливі.

Якщо розраховувати вартість експлуатації модернізованої системи, переведеної з газу на біопаливо для будинку на 450 м², то такі будівлі споживають газу понад 6000 м³/рік, що означає оплату газу по найвищому тарифу для населення. З 1 квітня 2015 року згідно постанови НКРЕКП № 583 від 03.03.2015 року затверджено роздрібні ціни на природний газ, що використовується для потреб населення. З 1 травня 2015 року ця цифра буде рівною 7,188 грн/м³.

Наступного сезону для такого будинку річна оплата за газ для обігрівання складе понад 43128 грн.

В табл.1 наведено порівняння витрат на опалювальний сезон за видами палива.

Таблиця 1

Порівняння витрат на опалювальний сезон за видами палива

Вид палива	Од. вим.	Теплотворна здатність, кКал.	Ціна, грн.	Середні витрати на опалювальний сезон на м^2 (168 мКал/м^2)		Загальна витрата на приміщення 1000м^2, Грн.
				Натур. показник	В грош. вираженні, грн.	
Газ	м^3	8000	5,1	24	122,4	122400
Електрика	кВт	-	1,08	195	210,6	210600
Центральне опалення	ГКал	480	0,168	80,64	80,64	80640
Деревні пелети	кг	4200	1,0	44	48,4	48400
Дрова	кг	2900	0,18	70	12,6	12600
Вугілля	кг	5200	1,5	38	57,2	57200
Торф	кг	2800	0,4	72	28,8	28800

Аналіз табл.1 показує, що витрати на опалювальний сезон газом становлять 122400 грн/1000 м^2, а дровами – 12600 грн/1000 м^2, що економить кошти в 9,7 разу.

Для визначення об'ємів різних видів палива на опалювальний сезон для такого будинку, можна скористатись даними з табл. 2

Таблиця 2

Об'єм різних видів палива

Паливо	Теплота згоряння, кВт/кг	Кількість палива на сезон, т (для будинку 450 м³)	Ціна палива, грн/т	Вартість на сезон, грн
Пелети	4,9	18,8	2000	37507
Брикети	4,7	19,6	1600	31282
Дрова	2,9 (1280 кВт/м³)	31,7 (70 м³)	600 (за м³ + робота)	42249
Вугілля	6,1	15,1	1800	27116
Газ	8,0 кВт/м³	11500 м³	3,652014 / 5,102015	41926 / 58581

Як видно з табл.2, найдешевшим видом палива є вугілля. Але таке паливо вимагає великих

людських затрат, некомфортності через запах (як в котельні так і біля будинку), є складності з закупівлею якісного вугілля, складно чистити котли і димохід від сажі і нагару. Вугілля є викопним паливом, яке переходить у розряд неосновних – для збереження обмежених запасів і для зменшення шкідливих та парникових викидів.

Вказана вартість дров враховує не тільки плату за куплені дрова, а й вартість розвантаження, складування, перенесення, подрібнення і враховуються втрати. Дешевше опалення брикетами має недолік в тому, що також є потреба у великих трудозатратах.

Витрати коштів на придбання твердопаливного котла та плата за опалення в опалювальний сезон в порівнянні з газовим котлом в 3 рази менші. Термін окупності твердопаливного котла становить приблизно 2 роки.

Висновки

Хмельницька область має великий потенціал біомаси, доступної для виробництва енергії, що є гарною передумовою для динамічного розвитку сектора біоенергетики. Основними складовими потенціалу є відходи сільськогосподарського виробництва (солома, ріпак, стебла кукурудзи, соняшнику).

Біоенергетика орієнтована на використання саме місцевих енергетичних ресурсів та можливостей. Тому область, маючи у своєму енергетичному балансі значну питому вагу енергії виробленої з біомаси отримає у перспективі найголовніше - енергетичну незалежність від світових тенденцій подорожчання викопних палив. Крім того, впровадження таких об'єктів дасть області цілу низку інших переваг – це і прогнозовані та стабільні тарифи на тепло, які повернуть довіру населення до соціальної політики регіональної влади, це збереження та створення нових робочих місць з гідним рівнем заробітної плати в комунальній сфері, це розвиток місцевого бізнесу зі збору та транспортування біопаливної сировини, це модернізація та оновлення морально застарілої та фізично зношеної комунальної інфраструктури. А також це дасть значно більші можливості щодо залучення міжнародних коштів на інфраструктурні та соціальні проекти.

Хмельниччина володіє величезними ресурсами для повсюдного впровадження біогазових технологій. В умовах високої вартості енергоносіїв використання економічних альтернативних відновлювальних джерел енергії для опалювання житла, освітніх навчальних закладів стає не лише актуальним, але і життєво необхідним.

Література

1. Габрель М.С. Виробництво твердого біопалива в Україні: стан та перспективи розвитку / Габрель М.С. – Л. : Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.9. – С. 126–131.

2. Гелетуха Г.Г. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні [Електронний ресурс] / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Желєзна // Аналітична записка БАУ. – 2014. – № 7. – Режим доступу : http://www.uabio. org/img/files/docs/Position-paper-uabio-7-ua.pdf

3. Кобец Н. Потенциал производства биотоплив в Украине. Влияние законодательных изменений на развитие сектора [Електронний ресурс] / Н. Кобец // Конференция «Аграрный сектор». – Режим доступу : http://slidegur.com/doc/1282957/n.-kobec.-potencial-proizvodstva-biotopliv-v-ukraine

4. Рішення двадцять восьмої сесії від 26 травня 2010 року № 13-28/2010 «Про Програму модернізації комунальної теплоенергетики Хмельницької області на 2010–2014 роки» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : oblrada.km.ua/doc/rish28_13.rtf

Рецензія/Peer review : 30.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Олександренко В.П.

UDC 614.8

M.G. SHKARABURA, O.M. ZEMLYANSKYI, O.M. MIROSCHNIK, M.V. LAVRUSENKO
Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of National University of Civil Defence of Ukraine

ANALYSIS OF WAYS OF DE-ENERGIZATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS WITH AIR POWER NETWORK INPUT

Abstract – *The article analyzes the ways and means of de-energization of residential buildings. Methods of performing inlet of electrical power networks in residential buildings are analyzed. The paper studies the special features of emergency de-energization in the case of fire in the residential sector by cutting the current-carrying wire and cables. Conditions of use of the hand-operated mechanical and non mechanical tool that is used by fire and rescue departments for emergency de-energization are indicated, the advantages and disadvantages are pointed out. Conclusions regarding due the effectiveness of the use of insulated tools for cutting stranded wires are drawn and potential ways for future research are specified. For emergency de-energization of residential buildings in case of fire dielectric tools are used. Regardless of the type the existing tools can be used for cutting wire separately in compliance with safety code. The presence of a metal tip in cutting tool during cutting of multiple-core wires and wires under voltage leads to electrical power network emergency state. In order to optimize the process of emergency de-energization of residential buildings is advisable to use the tools with extension bars as it is safer and helps minimize the number of rescuers involved into the work of the de-energization. So a promising area for future research is developing of tools for emergency de-energization of residential buildings in case of fire input to which is made by multiple-core wire or cable.*

Keywords: de-energization, cutting tool.

М.Г. ШКАРАБУРА, О.М. ЗЕМЛЯНСЬКИЙ, О.М. МИРОШНИК, М.В. ЛАВРУСЕНКО
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЗНЕСТРУМЛЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ПОВІТРЯНИМ ВВОДОМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

У статті здійснений аналіз способів і засобів знеструмлення житлових будівель. Проаналізовані способи виконання вводів електричних мереж у житлових будівлях. Розглянуті особливості аварійного знеструмлення при пожежі в житловому секторі шляхом перерізання струмоведучих жил проводів та кабелів. Висвітлено умови застосування ручного механізованого та немеханізованого інструменту, який використовується пожежно-рятувальними підрозділами для аварійного знеструмлення, вказано на переваги на недоліки. Зроблені висновки щодо ефективності використання діелектричного інструменту для перерізання багатожильних проводів та вказано на перспективні шляхи подальшого дослідження. Для аварійного знеструмлення житлових будівель при пожежі використовують діелектричний інструмент. Не залежно від виду існуючі інструменти можуть бути використані для пожильного різання проводів з дотриманням вимог безпеки праці. Наявність металевого леза в ріжучому інструменті при перерізанні багатожильних кабелів та проводів під напругою призводить до аварійного режиму роботи електромережі. З метою оптимізації процесу аварійного знеструмлення житлових будівель доцільно використовувати інструменти з подовжувальними штангами, тому що це безпечніше та сприяє мінімізації кількості залучених рятувальників до проведення робіт із знеструмлення. Таким чином перспективним питанням для подальших досліджень є розробка інструментальних засобів аварійного знеструмлення житлових будівель при пожежі, ввід до яких виконаний багатожильним проводом чи кабелем.

Ключові слова: знеструмлення, ріжучий інструмент.

Challenge problem. Fire fighting operations by conductive substances at any object begin after its de-energization. In order to minimize the time in the residential sector, de-energizing is performed by cutting electrical power network inlet of the house near power line pole. For this type of work a special dielectric tool is used [1]. The main disadvantages of the dielectric tool is the ability of the de-energization of the electrical power network with phase voltage till 220 V and the need for cutting each strand separately from each other, which is not possible when insulated wires and cables are used.

Actuality of emergency de-energization of residential buildings is confirmed by analysis of the fire statistics. If 90% of fires are fought with water, so the time of fire localization depends on from time of de-energization that in turn influences the material damage. Figure 1 shows the involvement of damage caused by fire depending on the time of the fire growth.

Analysis of recent achievements and publications

Our analysis of the existing tools and methods of emergency de-energization of residential buildings shows that for the purpose of cutting wires and cables rescuers use manual and mechanical tools with metal blades. The use of such a tool is possible in case when connection of a residential building is made by single-core wires but during cutting of multiple-core wire electrical power network emergency state is occurred.

Emergency de-energization during fire fighting is used by experts in Europe, CIS, USA and others. Hungarian researcher Joseph Toby pays a significant attention to the issue of cutting stranded insulated cables. He investigated the possibility of cutting the cables under 400 V, 6 kV and 15 kV by special hydraulic shears with a long hose (at least 8m) and a hydraulic pump. The researcher identified a safe distance for cutting live wires and proved that the use of a cutting tool can only be a last resort, because there is high probability of an accident as a result of short-circuit [2].

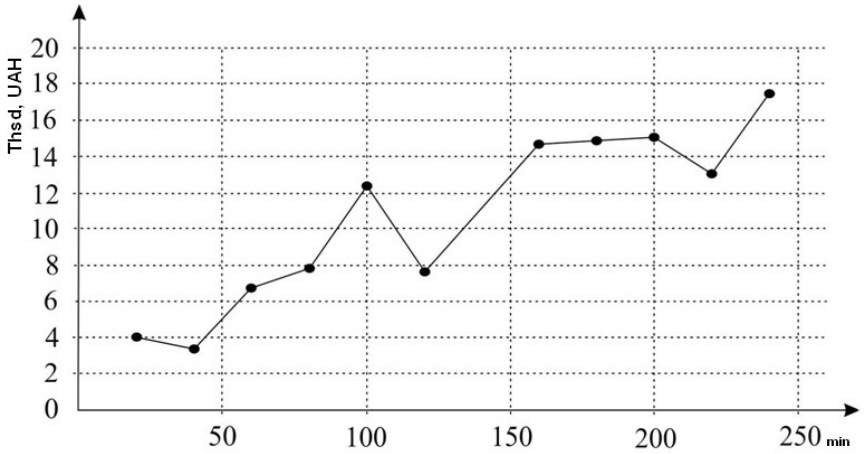


Figure 1. Averages of losses from fires in Cherkassy oblast depending on the time of the fire growth (from the moment of localization) in 2014

Proceeding from the above, we can conclude that the subject of the emergency de-energization of residential buildings, entering of which is made by multiple-core cable, requires further research towards the safety of rescuers and minimization of accidents in electrical power networks.

Problem definition and its solution

The main objective of the research is to analyze existing methods and means of de-energizing of residential buildings by cutting the conductors. To achieve this goal it is necessary to solve the following problems:

- To analyze techniques of electrical power network inlets in residential buildings;
- To analyze the methods of emergency de-energization of residential buildings in case of fire;
- To systematize the existing tools and methods for cutting wires and cables.

Results of the research will give the opportunity to mark off the ways to optimize the operational activities of the rescue fire units in the liquidation of fire in a residential building that is under voltage.

The presentment of the main research material with full justification of scientific results

Techniques of electrical power network inlets in private households

Up to date, two techniques of inlets in a private house are used: underground and aerial. Underground technique is that the column support runs downhill and cables are laid in the tube.

By aerial technique uses ropes on which cables are suspended or self-supporting insulated and uninsulated wires, within that the height from the ground shall not be less than 6 m above pass ways, not less 3.5 m above walkways and the attachment point on the house no low 2, 75 m.

- By 2011, for the installation of an overhead line inlet a wire without insulation of AC brand [3] was used. According to [3] nowadays wires of SSIW brands are used (Figure 2), which can be twin wire or four-wire. For underground inlet armoured and unarmoured cables are used.
- Inlet of power supply input of private households is engaged from 0.4 kV overhead lines of local networks.
- Earthling of the neutral wire definitely must be done, which according to [3] can have two implementation options:
- Earthed at regular distances (100 ... 200 m) neutral of the network serves as the neutral conductor circuit and zero protective conductor simultaneously – TN-C system;
- For the grounding of the equipment separate conductor is laid, which serves as the only protective conductor – TN-S system [3].

The second option is a must for residential, administration and amenity facilities, high occupancy buildings and similar which are building. In this case, in rooms with single-phase network, internal network is performed three wired – phase, neutral and protective conductors. At construction sites with three-phase consumers internal network is made by five-conductor line – 3 phase, 1 neutral and 1 protective (Figure 3).

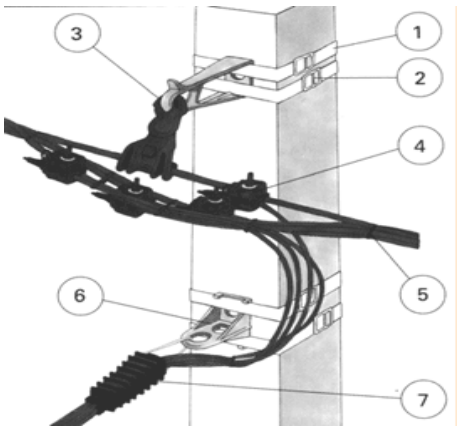
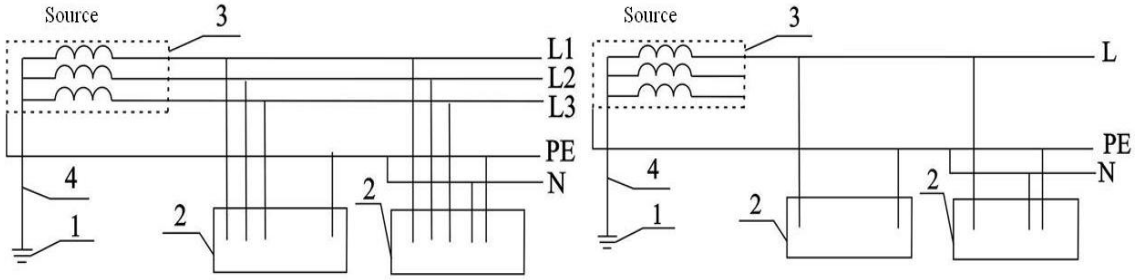


Figure 2. Branching to the consumer power line performed by the wire of SSIW brand, where: 1 - stainless steel strip 2 - strip connection, 3 - intermediate clamp with bracket, 4 - piercing clamp, 5 - cable tie, 6 - anchor pole bracket, 7 - anchor clamp



Three-phase network Single-phase network

Figure 3. Scheme of system grounding in three-phase and single-phase alternating-current electric installation with voltage up to 1kV, where: L1, L2, L3 - linear (phase) conductors; 1 – ground-wire of power supply; 2 – exposed conductive parts; 3 – ground-wire of exposed conductive parts; 4 – protective grounding conductor (grounding of the system is marked by thick lines); N - neutral conductor electrically connected to the neutral point of the power supply; L - linear (phase) conductor, PE - protective conductor

Independent from the considered options in the building when applying separate protective conductor, the last is branched from neutral of network at the inlet panel of the building till disconnect contacts, and to ensure its integrity and reliability in the network of this conductor should not be any disconnects, fuses and so on. So three-phase inlet is made by four-wire circuit and single-phase inlet is made by two-wire circuit till the input protection switching device. In both cases, protective wire PE can be added to.

Analysis of the special aspects of functioning of the three-phase electrical power networks shows that during the cutting wires separately there is a threat of three-phase or twice-phase formation range without phase-neutral wire. A feature of this mode is that in asymmetrical load in phases with a smaller load voltage rises sharply, while in the phases with harder load voltage sharply reduces (Figure 4). Such mode will lead to failure of electronic equipment and electric motors of refrigerators, washing machines, ventilation systems. In the absence of fault of protection devices this equipment can become a new source of inflammation.

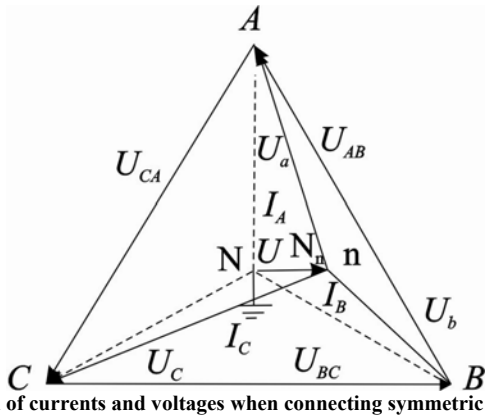


Figure 4. Vector diagram of currents and voltages when connecting symmetric load without neutral wire

Methods of de-energization of private households

One of the stages of operational actions of fire and rescue departments is to establish the place and method of power cut-off. There are two ways of the electrical network cut-off: a mechanical de-energization or emergency power cut-off. Emergency de-energization of the electrical network by cutting cores is performed if the electrical network is damaged and there is a risk of electric shock of rescuers that involved in fire-fighting, there is a risk of the beginning of new bodies of fire in case of getting water on them or there are conditions that hinder fire fighting operations and dismantling structures.

It is regulated by requirements [1] that the electrical networks and facilities under phase voltages above 220 should be disconnected by representatives of power engineering. Disconnect of electrical equipment with voltage phase in network above 220 personnel can be made by fire-rescue unit at the direction of fire ground commander or chief of operational activities [4].

During de-energization the rescuer should be guided by the requirements of security, namely: to work in dielectric protective equipment; to cut feeder outer cables only near insulators from the side of power consumption with the expectation that the wires which falling or sagging, are not left energized and to cut each wire (conductor) separately from the others; if the wires are hung on poles or on the racks, the rescuer need to climb the extension ladder installed around the column; to put a mat on the ladder rung, to stand on it and to consolidate himself by safety hook at ladder rung (working with a metal ladder between the safety hook and ladder rungs there is should be insulation lining) cutting should be started with the bottom wires in order for wires under voltage remain fixed on insulators and could no unite with each other or with other items, for such work should be involved at least two people of operative calculation.

Tools for cutting wires

Cutting wires is carried out using a special tool which according to the principle of work is divided into three main types: mechanical, hydraulic and electric. To facilitate the efforts constructions with hinge elements are used, in scissors with extension rod force to the cutting head is transmitted by the strand (the rope) or rod. The common element of all types of cutting tool is a cutting metal tip.

Instrument manufacturers do not allow simultaneous cutting of several leading conductors under voltage, as a result of short circuit tool cutting head breaks down. The exception is the tool "Hydraulic safe cable cutting machine Tehnorez^{TM}" which has a special grounding rod and knives are made from stainless steel with thickness of 14 mm, which even after a short-circuit remain working. Rescuer safety when working with a hydraulic machine is achieved by the machine's equipping by remote control of the cutting head at a safe distance and use of hydraulic high pressure hose. The main disadvantages of this tool are the impossibility of remote work at height and the limit of the distance to the cutting place which is caused by length of the hose.

To make an emergency de-energization at a distance models of tools with extension bar are used. Tool REP-2 is made for cutting separately overhead power lines and internal wiring under voltage up to 1000 V. Unlike to ordinary scissors for cutting electrical wires this tool can cut overhead power transmission lines under voltage directly at a height of 6.1 meters from the ground without fire ladders that allows doing de-energization by a single worker.

Conclusions

The analysis of methods of performing inlet of electrical power networks in residential buildings points to the existence of underground and air input. The air input until 2000 was made by wires of AC brand, and from 2011 - self-supporting wires of SIP brand.

For emergency de-energization of residential buildings in case of fire dielectric tools are used. Regardless of the type the existing tools can be used for cutting wire separately in compliance with safety code. The presence of a metal tip in cutting tool during cutting of multiple-core wires and wires under voltage leads to electrical power network emergency state.

In order to optimize the process of emergency de-energization of residential buildings is advisable to use the tools with extension bars. In comparison with the dielectric scissors the tool with extension bars is safer and helps minimize the number of rescuers involved into the work of the de-energization.

Prospects for further research. So a promising area for future research is developing of tools for emergency de-energization of residential buildings in case of fire input to which is made by multiple-core wire or cable. The development of such tools should ensure the implementation of a number of basic requirements, including: efficiency of the action as to de-energization of residential building, rescuers safety during its use, and also to exclude the possibility of electrical power network emergency state.

References

1. Pravyla bezpeky pratsi v orhanakh i pidrozdilakh MNS Ukrainy. (Dlia pidrozdiliv derzhavnoi pozhezhnoi okhorony). Nakaz MNS vid 07.05.07, No. 312.

2. Statystyka pozhezh v Ukraini. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut tsyvilnoho zakhystu. (November 12, 2015). URL: http://www.vedelem.hu/letoltes/ujsag/v200701.pdf

3. Tóbi József: Feszültség alatti elektromos berendezések, kábelek oltási lehetõségei. VÉDELEM Online – a virtuális szakkönyvtár. 2007. 14. évf. 1. szám. pp. 25–27. (November 12, 2015). URL: http://www.vedelem.hu/letoltes/ujsag/v200701.pdf

4. Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok. 4-te vydannia, pererobleno y dopovneno. Kharkov, Fort, 2011, 736 p.

5. Statut dii u nadzvychainykh sytuatsiiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu. Zatverdzheno nakazom MNS Ukrainy vid 13.03.12, No. 575.

Рецензія/Peer review : 10.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. О.В. Кириченко

УДК 621

А.П. БІЛИК, Д.А. ФУТОРНИЙ
Хмельницький національний університет

МЕБЛЕВА ПРОМИСЛОВІСТЬ: АНАЛІЗ УМОВ ПРАЦІ ТА СТАН ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ В ГАЛУЗІ

У статті проведено аналіз умов праці та дотримання техніки безпеки на підприємствах меблевої промисловості. В результаті дослідження виявлено причини нещасних випадків та професійних захворювань, проаналізовано їх кількість за останні 5 років. Визначено недоліки з питань охорони праці, які присутні на підприємствах галузі, а також надано рекомендації щодо покращення умов праці та промислової безпеки.

Ключові слова: промисловість, охорона праці, нещасний випадок, умови праці, причини, меблі.

A.P. BILYK, D.A. FUTORNYI
Khmelnytsky National University

FURNITURE INDUSTRY: EVALUATION OF WORKING CONDITIONS AND THE STATE OF OCCUPATIONAL INJURIES IN THE INDUSTRY

Abstract – The article analyzes the working conditions and compliance with safety at the enterprises of the furniture industry. The study identified the causes of accidents and occupational diseases, analyzes their number in the last 5 years. Objectives work on health caused by industrial activity all business units and focused on the requirements of public policy on health. Data in the article also stated the need to introduce advanced technology in the production of furniture and how to increase the efficiency of labour protection in enterprises. Detected deficiencies on safety that are present in the industry, as well as recommendations on improving working conditions and safety.

Keywords: industry, safety, accidents, work conditions, causes, furniture.

Вступ

Створення безпечних умов праці та екологічної безпеки для працівників меблевого виробництва - це одне з досить важливих і досить складних завдань, які необхідно розв'язати Уряду України на етапі переходу суспільства до ринкових відносин.

На стан умов праці в меблевій промисловості України впливають багато чинників, зокрема економічний стан підприємств, забезпеченість їх матеріально-технологічною базою, безпечним і високопродуктивним обладнанням тощо.

Меблева промисловість України за своєю специфікою виробництва належить до небезпечних і шкідливих галузей деревообробки. Меблеве виробництво - це комплексне виробництво, в склад якого входять різні за ступенем безпеки праці та екологічної безпеки виробничі підрозділи та дільниці: цехи гідротермічної, механічної обробки деревини, личкувальні, опоряджувальні та збиральні цехи.

Найнебезпечнішими виробничими підрозділами меблевого виробництва є цехи механічної обробки деревини, які найбільше насичені верстатним обладнанням. Небезпека механічної обробки деревини, в першу чергу, характеризується наявністю двох груп особливостей; які пов'язані:

а) зі специфікою матеріалу (деревини), що обробляється;

б) зі специфікою конструкції та режимами роботи деревообробного обладнання.

Знання основ техніки безпеки, виробничої санітарії і протипожежних заходів є одним з важливих факторів запобігання виробничим травмам і професійним захворюванням і ліквідації їх.

На підприємстві адміністрація зобов'язана створити такі умови праці, які б виключали можливість виникнення травм та професійних захворювань і сприяли підвищенню продуктивності праці. Незалежно від ступеня небезпеки виробництва на всіх підприємствах і в організаціях проводиться навчання з правил техніки безпеки прийнятих на роботу працівників, які не мають професії або її міняють, а також інструктажі при підвищенні кваліфікації робітників.

Аналіз умов праці в галузі

Метою аналізу умов праці є визначення небезпечних і шкідливих чинників виробництва та потреби в розробленні засобів і заходів для усунення ризику травмування та професійних захворювань і створення умов для високопродуктивної праці [1].

Під час виконання трудових обов'язків на працівників меблевої промисловості впливають наступні виробничі фактори [2]:

1. Фізичні небезпечні та шкідливі виробничі чинники: машини і механізми, що рухаються; рухомі частини виробничого обладнання; рухомі вироби, заготовки, матеріали; конструкції, які руйнуються; підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи знижена температура повітря робочої зони; підвищена температура поверхонь обладнання, матеріалів; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень вібрації; підвищений рівень інфразвуку; підвищений рівень ультразвуку; підвищена чи знижена вологість повітря; підвищена чи знижена рухомість повітря; підвищена чи знижена іонізація повітря; високий рівень напруги в електричному ланцюгу, замикання якого може пройти через тіло людини; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітних випромінювань; відсутність або недостатність природного світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; знижена контрастність; прямий та відбитий блискіт; підвищена пульсація світлового

потоку; підвищений рівень ультрафіолетової радіації; підвищений рівень інфрачервоної радіації; гострі краї, задирки, шорсткість на поверхнях заготовок, інструменту та обладнання; розміщення робочого місця на значній висоті відносно поверхні землі (підлоги).

2. Хімічні небезпечні та шкідливі виробничі

- чинники: за характером впливу на організм людини: токсичні; подразнюючі; канцерогенні; алергенні; мутагенні.
- за шляхом проникнення в організм людини через: органи дихання; шлунково-кишковий тракт; шкіру. і слизову оболонки.

3. Біологічні небезпечні і шкідливі виробничі чинники: патогенні мікроорганізми та продукти їхньої життєдіяльності.

4. Психофізіологічні небезпечні і шкідливі виробничі чинники: фізичні перевантаження (статичні і динамічні); нервово-психічні перевантаження (розумове перевантаження, монотонність праці, емоційні перевантаження).

5. Джерелами небезпечних та шкідливих виробничих чинників можуть бути: нерегламентовані режими роботи технологічного устаткування; транспортні засоби, вантажопідіймальне устаткування, механізми обладнання, деталі та вироби, які рухаються; устаткування, яке працює під тиском; електромережі, електрифіковане устаткування і інструменти; інженерні комунікації; роботи, які спричиняють психофізіологічні перевантаження; токсичні, легкозаймисті, вибухонебезпечні речовини; помилкові дії працівників, аварії.

До прикладу: у продовж 2014 року на підприємствах меблевої промисловості внаслідок допущення порушень вимог охорони праці під час виконання трудових обов'язків отримали травми 76 працівники, з них 9-смертельні. В умовах, що не відповідали санітарно-гігієнічним нормам, було зайнято близько 10 тис. працівників.

Турбота про людину праці в багатьох випадках залишає бажати кращого, упродовж трьох останніх років коефіцієнт частоти травматизму становить 0,7. Серйозне занепокоєння викликає коефіцієнт тяжкості травматизму. За підсумками 2014 року кількість днів непрацездатності в розрахунку на один нещасний випадок становила 42 дня. Високий коефіцієнт тяжкості свідчить про приховування від розслідування та облік нещасних випадків з незначною втратою працездатності

Кількість нещасних випадів у галузі подана на рис. 1.

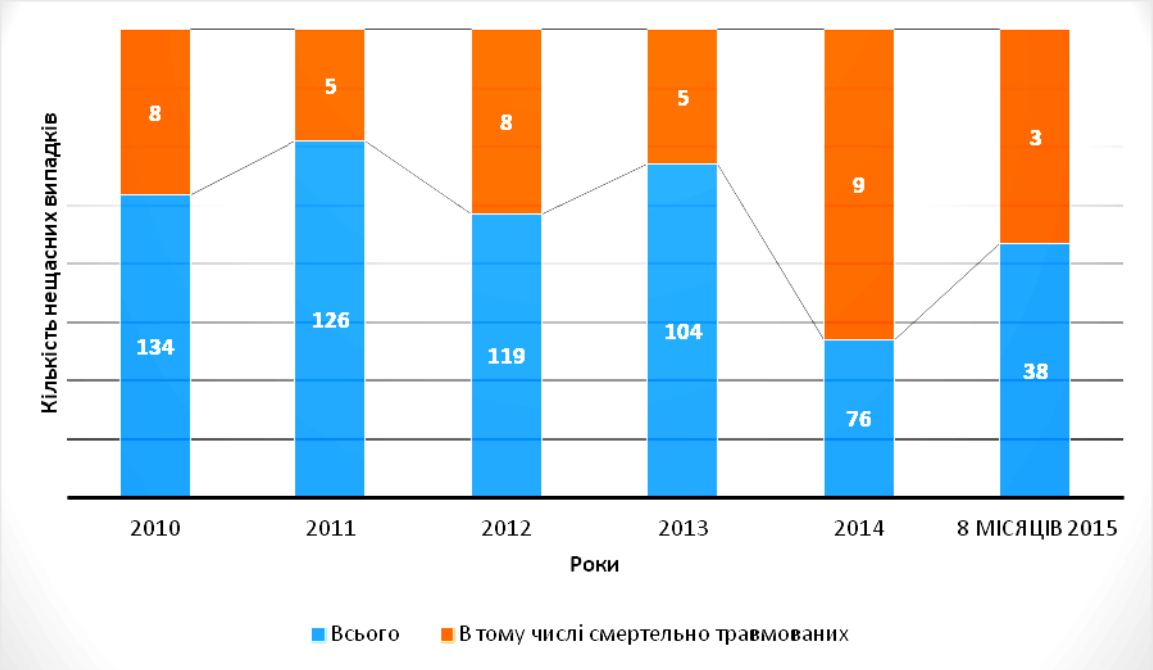


Рис. 1. Кількість нещасних випадків в деревообробній галузі за останні 5 років

Як показує аналіз виробничого травматизму, 81% нещасних випадків на виробництві сталося через організаційні причини, це невиконання вимог інструкцій з охорони праці – 23 % від загальної кількості потерпілих, порушення правил дорожнього руху – 10 %, невиконання посадових обов'язків – 5 %, інші організаційні причини – 26% (рис. 2).

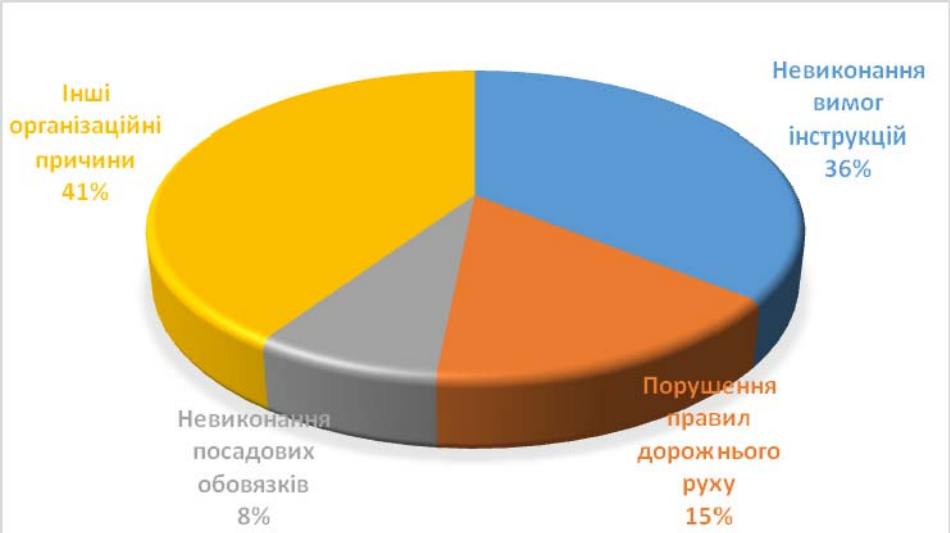


Рис. 2. Причини виникнення нещасних випадків

Для зменшення кількості нещасних випадків потрібно не лише впроваджувати передові технології у виробництво меблів, а і підвищити ефективність діяльності з охорони праці на підприємствах.

Пропозиції щодо підвищення ефективності діяльності з охорони праці на підприємствах

1. Запорукою зниження рівня виробничого травматизму і поліпшення стану охорони праці є піднесення економіки, що в сучасних умовах господарювання може бути досягнуто лише шляхом децентралізації виробництва, запровадження на нерентабельних підприємствах посади найманого менеджера, який підзвітний і переобирається на зборах акціонерів.

Усі госпрозрахункові підрозділи підприємства переводяться на самостійний фінансовий баланс. Це розвиває ініціативу і творчість трудових колективів у досягненні прибутковості виробництва й одночасно вирішує проблеми охорони праці.

2. Поліпшення стану охорони праці на підприємствах може бути досягнуто шляхом переходу від окремих розрізнених заходів до системи планомірного цілеспрямованого управління цією діяльністю з чітким визначенням для кожного структурного підрозділу підприємства переліку та змісту завдань і функцій управління.

Завдання роботи з охорони праці зумовлені всією виробничою діяльністю підрозділів підприємства і спрямовані на виконання вимог державної політики з охорони праці.

3. Основними функціями управління, згідно із сучасною теорією менеджменту, є:

— планування;
— організація;
— мотивація;
— контроль.

Згідно з OHSAS 18001 це [4]:

— розроблення політики з охорони праці;
— планування;
— впровадження і функціонування;
— перевірка й корегувальні дії;
— огляд керівництвом і постійне вдосконалення.

Функція планування забезпечує виконання політики з охорони праці і включає в себе працеохоронний аудит, моніторинг, маркетинг, прогнозування необхідних заходів охорони праці з метою попередження виробничого травматизму, профзахворювань і поліпшення умов праці. Для цього розробляються відповідні цільові програми і здійснюється перспективне, поточне й оперативне планування роботи з охорони праці. Плани, перш за все, повинні мати цільову спрямованість на запобігання травматизму і профзахворюванням, оптимізовані на досягнення найкращих результатів при певних витратах. Плани складаються на основі оцінки ризику за робочими місцями, виконання нормативних актів і політики підприємства з охорони праці.

Функція організації, впровадження і функціонування передбачають обов'язки, права і відповідальність кожної посадової особи з вирішення накреслених завдань, програм, планів і політики управління охороною праці, організації служби охорони праці, профспілкового і громадського контролю щодо зменшення ризику.

Функція мотивації повинна бути спрямована на створення в кожному структурному підрозділі підприємства атмосфери уважного ставлення до підлеглих, застосування методів морального й матеріального стимулювання персоналу за усунення неприпустимих ризиків.

Функція контролю, обліку та аналізу, перевірка, облік і корегувальні дії з охорони праці повинна бути комп'ютеризована, із застосуванням сучасних методів моніторингу й аудиту, що активізує цю

діяльність щодо проведення корегувальних і запобіжних дій для зменшення ризику.

4. З метою виконання планових та інших завдань роботи з охорони праці на підприємствах необхідно створювати фонди охорони праці, відраховуючи для цього 0,5 % від обсягу реалізації продукції (послуг).

5. Сплати штрафних санкцій з боку підприємств повинні здійснюватися з прибутку підприємств і не накладатися на собівартість продукції (послуг).

6. Фонд страхування від нещасних випадків і профзахворювань передбачає диференційовані тарифи залежно від рівня ризику даного виробництва.

7. Продукція, яка випускається підприємствами, повинна мати сертифікат на відповідність до вимог нормативної документації з охорони праці; необхідно також здійснювати експертизу та ліцензування проектно-конструкторської і технологічної документації на відповідність нормативним актам.

8. На підприємствах доцільно здійснювати систематичне інженерне забезпечення системи управління охороною праці шляхом приведення виробничого обладнання, технологічних процесів, будівель і споруд, санітарно-гігієнічного стану, санітарно-побутового забезпечення у відповідність до вимог нормативних актів з охорони праці із застосуванням сучасних методів інжинірингу і реінжинірингу.

9. Для інструктажу й навчання працівників з охорони праці варто застосовувати сучасні методи активного навчання, виховання у працівників психології і культури безпеки, що унеможливлює будь-які небезпечні дії. Перед кожною потенційною небезпечною операцією складається план її виконання, виписується наряд-допуск, проводиться детальний інструктаж. При першому порушенні правил безпеки порушника попереджають, а при повторному порушенні чинять згідно з КЗпП.

Система управління охороною праці — це повсякденно діюча функціональна підсистема управління підприємством, установою, організацією для виконання розробленої політики.

10. В сучасних ринкових умовах відбуваються безперервні суттєві зміни в технологіях, ринках збуту, потребах споживачів, тому підприємства для збереження конкурентоспроможності змушені весь час перебудовувати виробничий процес і бізнес-плани із застосуванням системного підходу. Основним інструментом сучасного менеджменту стає аудит, моніторинг і маркетинг, інжиніринг (реінжиніринг), навчання персоналу. Якщо аудит і моніторинг визначають реальний стан підприємства, у т. ч. стан охорони праці, маркетинг передбачає необхідні заходи, то інжиніринг і реінжиніринг здійснюють необхідні технологічні й організаційні заходи щодо проектування, побудови, радикального перепроектування і перебудови бізнес-процесів, у т. ч. і заходи з охорони праці, для досягнення суттєвого поліпшення показників діяльності підприємства (вартість, якість, охорона праці та ін.).

Системний підхід — запорука успіху підприємства в галузі охорони праці.

Література

1. Оперативна інформація Державної служби гірничого нагляду та промислової безпеки України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://dnop.gov.ua/index.php/uk/operativna-informatsiya/neshchasni-vipadki/615-neshchasni-vipadki/derevoobrobna-promislovist.

2. Правила охорони праці в деревообробній промисловості : зареєстровані в Міністерстві юстиції України 16 березня 2005 р. за № 306/10586 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0306-05

3. Закон України «Про охорону праці» № 29-IV від 21.11.2012 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694-12.

4. Розміщення продуктивних сил [Електронний ресурс] : підручник / за ред. Є.П. Качана – К. : ВД "Юридична книга", 2001. – Режим доступу : http://zakdu-business.weebly.com/uploads/2/4/5/3/2453916/zhuk_krul_-_rozmischennja_produktuvnux_sul_i_ekonomika_regioniv_ykrainu.pdf

5. OHSAS 18001:2007. Система менеджмента профессиональной безопасности и здоровья. Требования [Електронний ресурс]. – Режим доступу : *sic.com.ua/wp-content/uploads/2009/11/*

Рецензія/Peer review : 23.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Стаття рецензована редакцією

UDC 621

J. MORAVEC
University in Žilina, Slovakia

TOOLS FOR HYDROSTATIC SHAPING OF METAL SHEET

The paper describes a method of hydro-forming sheets. Described the theoretical foundations and the necessary knowledge. The structural design tools are shown. One of the ways unconventional forming is forming in a liquid environment , specifically – sheet metal forming by applying hydrostatic press. For the sphere of production in the engineering area will necessarily need to focus on environmental solutions. Use of water as an essential element of living nature in the manufacturing process is one of the roads leading to this goal.

Key words: tool for rotary yields, laboratory, hydrostatic, liquid, environment, knowledge, hydraulic system, metal.

Я. МОРАВЕЦ
Жилінський університет, Словаччина

ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ ГІДРОСТАТИЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ЛИСТА З МЕТАЛУ

У статті описується метод гідроформування листів. Описані теоретичні основи і необхідні знання. Показані структурні інструменти дизайну. Одним із нетрадиційних способів є формування в рідкому середовищі, зокрема листове штампування шляхом застосування гідростатичного тиску. Для сфери виробництва в інженерно-технічній галузі, безсумнівно, необхідно зосередитися на екологічних рішеннях. Використання води як важливого елемента живої природи у виробничому процесі є одним з методів, що ведуть до цієї мети.

Ключові слова: інструмент для обертального механізму, лабораторія, гідростатичний, рідина, навколишнє середовище, знання, гідравлічні системи, метал.

Introduction. The principle of hydrostatic forming consists in an activity of hydrostatic p_H versatile pressure of fluid in forming tool and punch. Among the methods used for drawing sheet the important place are holding methods which using for this purpose, elastic-plastic environment. In this case it is called loose tool. Against a rigid tool it has many advantages – saving production cost on tool especially for smaller series of moldings with complex shapes. Furthermore, to simplify the process of forming shaping without need of fit of active parts of the tool and also the use of complex retainers [1–5].

Company CINCINATI Milling Machine Co. developed method of deep drawing with liquid – Hydroform method – already in 1951. In this method there is used a universal drawing die formed with container filled with water or oil, which is closed with a rubber membrane. Rigid punch is made of cheap steel. Production costs for the drawing die represent only 25–30% for making classic all-metal tool. In following text, the attention is given to the issue of application of this method in surface forming, using a special made tool for laboratory conditions.

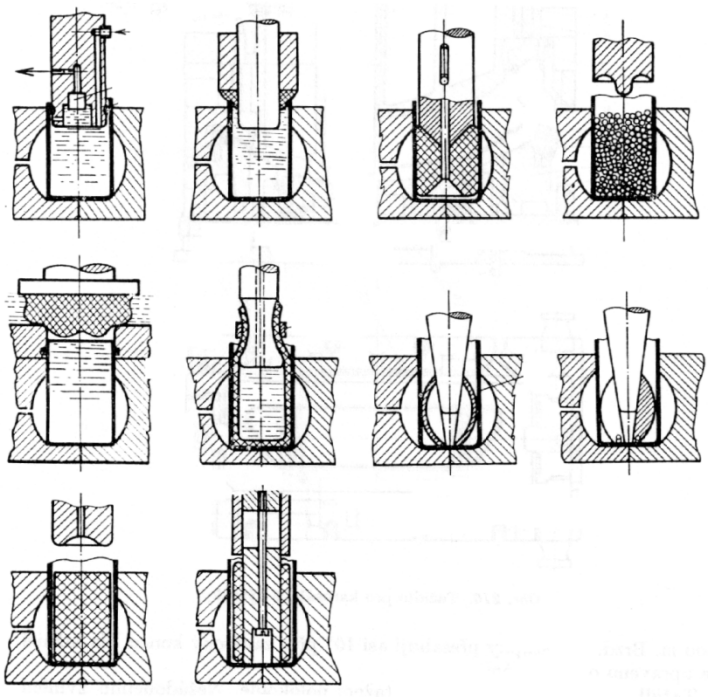


Fig. 1. Principles of forming sheets in the flexible and liquid environment

Theoretical knowledge. At constant temperature the volume of liquid changes very little due to pressure, basically it is a phenomenon and the resulting knowledge that liquids are minimum compressible. If the pressure which is exert on the liquid increased, than the volume reduces by a very small value. If the pressure reduced on the original value, than the fluid immediately deliver on the original volume. Liquids are thus perfectly elastic. Compressibility of the fluids is evaluated by known coefficient of compressibility, which is defined by the following formula (1):

$$\gamma = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dp} \text{ Pa}^{-1} \quad (1)$$

where: V is the initial volume of liquid and dV is elementary reduction of volume caused by elementary increasing pressure on the value of dp.

The coefficient of compressibility is different for different kinds of liquids and at high pressures it decreases, with increasing temperature it usually increases. Its value for water at 20 °C: $\gamma = 4{,}998.\ 10^{-10}$ (Pa^{-1}).

Forming in the liquid environment is using; respectively there is applied physical knowledge, known as Pascal's Law. According to the figure: there is the vessel filled with incompressible liquid with density ρ, which is in equilibrium in the gravitational field of the earth [4–6].

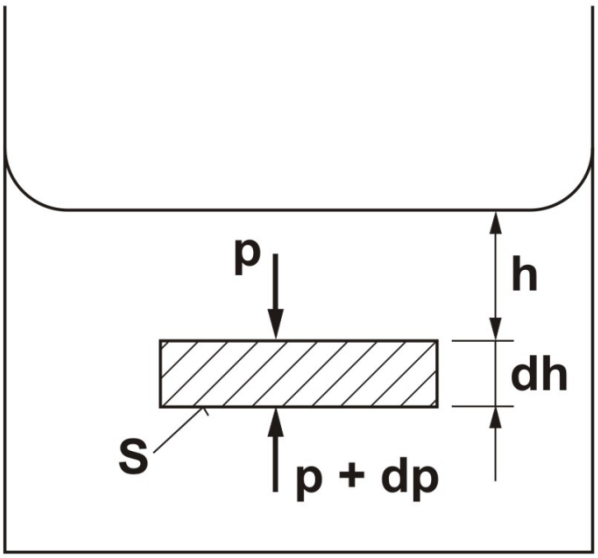


Fig. 2. Used for derive the relations

There is an element in the depth h below the surface of the liquid with the volume of an elementary cylinder with base S and height dh. At selected elementary volume of liquid there is applied self-gravity (volume force); also pressure forces (surface force) of the rest of the liquid. Pressure forces operated on the upper and lower base of the elementary cylinder have a vertical direction. Pressure forces operated on the shell of the cylinder have horizontal direction. Equilibrium conditions require that the vector sum of all forces had to be zero. Since the gravity of the selected quantity of liquid is:

$$dG = \rho\, Sg\, dh \quad \text{N} \qquad (2)$$

and size of the resultant pressure force of the vertically direction which is oriented upward (lift):

$$df = (p+dp)\, S - pS = Sdp \quad \text{N} \qquad (3)$$

There is equation resulting from the equilibrium conditions: $\rho\, Sg\, dh - Sdp = 0$. (4)

After editing and integrate equation (4) there will be: $p - \rho\, gh = const$. (5)

The potential of the earth's gravitational field at a depth h below surface of the liquid can be expressed with the equation $V = -\, gh$, (6) and equation (5) goes to the form: $p + \rho V = const$. (7) if provided that at the place of liquid surface the potential is equal to zero. Equation (7) has general validity. It could be write: if the incompressible fluid is at peace in any force field, than potential energy is the sum of its unit volume and pressure everywhere in the liquid is the same. If the liquid is under bigger pressure and do not take too much volume, so changes in the potential of the liquid are small than member ρV in equation (7) can be practically constant and from equation (7) there can be derive the equation $p = const$. (8), what is the expression of Pascal's law which is about evenly spread of pressure in fluids [7–9].

Experimental section. For the experimental work there was design forming tool, in which are applied the relevant knowledge of mechanics of liquids. There are photographs of the tool on Fig. 3 and 4. There was verifying the suitability of hydraulic solution and the convenience of operation of the tool that is at the appropriate level. Found evidences are adequate and it is only a matter of time before the solution will be optimized, respectively there will be add peripheral components which are necessary for convenience of operation and shortening the time which is needed to produce sheet metal part.

Description of the tool. Forming tool for hydrodrawing is composed of two basic parts. The lower part is a Plexiglas block. There are M6 screws which are molded into a block to secure the upper part of tool. There is a hole which is lead out on the side for intake and discharge of pressure liquid. The entire lower part is assembled with screws and stands on four legs. There is rubber gasket slid on M6 screws.

Fig. 3. Photograph of assembled tool

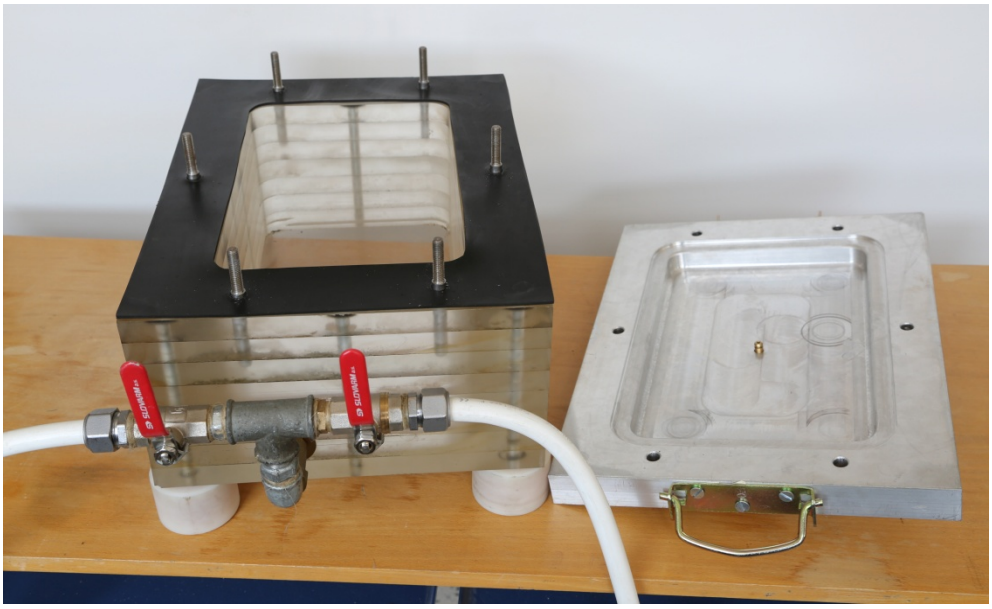


Fig. 4. Photograph of disassembled tool

The upper part is a plate which is made of dural, in which is milled the required shape of the drawn part. The cavity cannot have sharp edges and transitions must be rounded. Part is drilled with the bottom and is plugged on the M6 screws which are screwed in the tank.

There is pressure liquid supplied to the tool and because of her influence the blanking layout sheet is evenly squeezed into a selection on top part of the tool. In Figure 5 is a diagram of insertion of the tool into the hydraulic system.

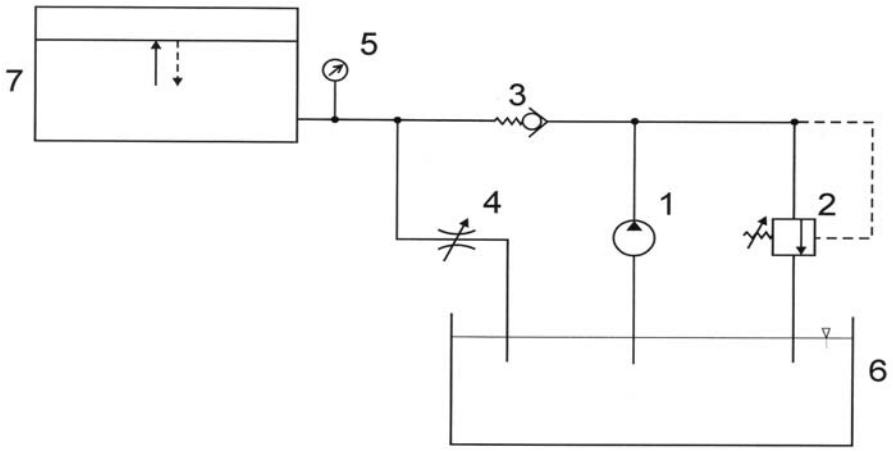


Fig. 5. Diagram of insertion of tool for hydrodrawing into the hydraulic system 1 - gear pump, 2 - SV - safety valve, 3 - RV- return valve, 4 - TV - throttle valve, 5 - gauge, 6 - tank, 7 - tool - forming chamber

Technological process for working in the tool

- insert blanking layout sheet on top part of the tool,
- plug the top part on the M6 screws,
- screw M6 nuts,
- turn on the pump, check the pressure of liquid, forming drawn part,
- turn off the pump, remove the liquid from the tank,
- remove the top part, postpone,
- take out stamping and visually check out surface of the drawn part,
- postpone part to pallet.

When using water as a medium, although it is relative the most accessible, there is a risk of corroded surface of drawn part. Its advantage is that it does not load the ecological environment. Oil is the most optimal in terms of tribological characteristics for the job. Proper viscosity of oil should be tested. The oil has a clear priority over another media. Disadvantage – after crash escape into the environment and the worker must have gloves. Figure 6 and 7 are details tool for rotary yields.

Fig. 6. Photograph of assembled tool for rotary yields

Fig. 7. Photograph of disassembled tool for rotary yields

Conclusion. Presented tool is useful in the laboratory conditions at the Faculty of Mechanical Engineering University of Žilina. It is a good complement to the teaching of forming. Experimental work confirmed the suitability of this type of forming especially for the piece production and application of the tool is expanding the sphere of physical knowledge which are used in sheet metal forming. Experimental works were carried out in laboratory of forming techniques on Department of Engineering Technology, Faculty of Mechanical Engineering of the University of Žilina.

References

1. Moravec, J. et al. (2011), Shapping Instruments, University of Žilina, 332 pp.
2. Moravec, J. et al. (2010), Technology shapping technical materials, Žilina , 250 pp.
3. Moravec, J. (2011), Uncoventional merthods os forming metals, Žilina, 285 pp.
4. Noskievič, J. et al. (1997), Hydromechanics, Prague, 354 pp.
5. Bogomolov, A. I. (1972), Gidravlika, Moskva.
6. Jaeger, Ch. (1987), Fluid Transient in Hydro-Electric Engineering Practice, Glasgow.
7. Hosford, W. F.; Caddel, R. (2011), M. Metal Forming, Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press, 331 pp..
8. Kumar. S. (2008), Technology of Metal, New Delhi, pp. 358.
9. Marciniak, Z.; Duncan, J.L.; Hu, S.J. (2002), Mechanics of Sheet Metal Forming. Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford, pp. 320.

Рецензія/Peer review : 8.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Шалапко Ю.І.

UDC 519.816::519.226.3

V.V. ROMANUKE
Khmelnitskiy National University

META-MINIMAX APPROACH FOR OPTIMAL ALTERNATIVES SUBSET REGARDING THE CHANGE OF THE RISK MATRIX IN ENSURING INDUSTRIAL AND MANUFACTURING LABOR SAFETY

Industrial and manufacturing labor safety is considered from the point of view of minimizing risks of getting human harm or injuries. To ensure minimal damage under possibly worst conditions and poor predictability, risks are minimaxed regarding the change of the risk matrix. The change is explained as an aftermath of that the point evaluation of the risk matrix is impossible, and so this matrix is represented as a finite set of matrices implying the risk matrix change through this set. Each version of the risk matrix corresponds to a state which is called the metastate. Thus the change of the risk matrix is formalized. Formally, the finite change of the risk matrix can be substituted with the three-dimensional risk matrix. Optimal alternatives subset regarding the change of the risk matrix is obtained by the suggested criterion. This criterion is a meta-minimax approach considering, however, four cases. These four cases are generated from that there are probabilistic measures relating to ordinary states and a probabilistic measure over metastates. And each of the two types of the probabilistic measure is considered available or unavailable. Finally, a way of sorting metastates is discussed. In this way, either versions of the risk matrix or stochastic matrices with probabilistic measures relating to ordinary states can be sorted using a distance in the space of real-valued matrices of the corresponding size.

Keywords: labor safety, industrial and manufacturing labor risks, risk matrix, minimax, alternative, metastate, meta-minimax, minimaximax.

В.В. РОМАНЮК
Хмельницький національний університет

МЕТА-МІНІМАКСНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ПІДМНОЖИНИ ОПТИМАЛЬНИХ АЛЬТЕРНАТИВ, ЩО ЗВАЖАЄ НА ЗМІНУ МАТРИЦІ РИЗИКІВ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ОХОРОНИ ПРОМИСЛОВОЇ ТА ВИРОБНИЧОЇ ПРАЦІ

Розглядається безпека промислової та виробничої праці з точки зору мінімізації ризиків отримання людиною уражень або пошкоджень. Заради забезпечення мінімальних збитків за ймовірно найгірших умов та слабкої передбачуваності ризики визначаються на основі мінімаксу, що зважає на зміну матриці ризиків. Ця зміна пояснюється як наслідок того, що точкове оцінювання матриці ризиків неможливе, і тому ця матриця представляється у виді скінченної множини матриць, яка продукує зміну матриці ризиків. Кожен варіант матриці ризиків відповідає деякому стану, котрий називається метастаном. Відповідним чином матриця ризиків і формалізується. Скінченна зміна матриці ризиків може бути формально замінена тривимірною матрицею. Підмножина оптимальних альтернатив, що зважає на зміну матриці ризиків, отримується за запропонованим критерієм. Цим критерієм є мета-мінімаксний підхід, котрий допускає, між іншим, чотири можливості. Ці чотири випадки випливають з того, що розрізняють імовірнісні міри щодо звичайних станів й імовірнісну міру щодо метастанів. І кожен з цих двох типів імовірнісної міри розглядається доступним та недоступним. Зрештою, обговорюється спосіб сортування метастанів. За цим способом можуть сортуватися або варіанти матриці ризиків, або стохастичні матриці з імовірнісними мірами щодо звичайних станів з використанням деякої метрики у просторі дійснозначних матриць відповідного розміру.

Ключові слова: безпека праці, ризики промислової та виробничої праці, матриця ризиків, мінімакс, альтернатива, метастан, мета-мінімакс, мінімаксимакс.

Importance of minimizing the industrial and manufacturing labor risks

Ensuring labor safety and protection is the main task in any industrial branch. While manufacture process is projected, the manufacturing human labor is to be designed safe. This especially concerns heavy industrial branches, i. e. machine-building, metal processing, large-sized constructing, etc. In these branches, risks of getting human harm or injuries are higher than elsewhere. Thus, minimization or reduction of the risks must be early implemented, before the process starts.

Approaches to minimizing risks

Due to poor predictability, industrial risks are minimized under uncertainty. Uncertainty can be reduced as statistics grows. When statistics is unavailable, risks are minimaxed in order to ensure minimal damage under possibly worst conditions [1, 2]. Formally, this is about the criterion of Wald or the criterion of Savage [3, 4]. Growing statistics allows to estimate some situations statistically in the sense of probabilistic measure [4, 5]. Then, probabilistic criterions can be applied to calculate risks and make an appropriate decision. Basically, they are criterions of Bayes — Laplace (BL), Germeyer, Hodges — Lehmann (HL) and other hybridized rules [4, 6, 7]. These criterions, however, do not admit that the decision matrix or risk matrix (RM) may change. And if RM changes, what reflects real influences of factors in industrial processes, even the best-assurance minimax criterion (or BL criterion related to minimax) comes inconsistent.

Goal of the article and tasks to be accomplished

Based on that RM may change, generating uncertainties in its elements, the goal is to state a criterion which could regard the change. Both unavailability of probabilistic measures and their availability must be considered. For reaching the goal, the following tasks are to be accomplished:

1. Formalize the change of RM.
2. Suggest rules for obtaining the optimal alternatives subset (OAS) regarding the change of RM. For doing

that appropriately, consider four cases:

2.1. Any probabilistic measures are unavailable or uncertain.

2.2. Probabilistic measures are available. Note that these measures relate to ordinary states whose evaluations are in columns of RM.

2.3. Probabilistic measures are unavailable, but a probabilistic measure over states of the changing RM is available. Henceforward, these states are called metastates.

2.4. Both probabilistic measures relating to ordinary states and the probabilistic measure over states of the changing RM (over metastates) are available.

Formalization of RM change

Let $\mathbf{R}_k = \left(r_{ijk}\right)_{M\times N}$ be RM at the k-th metastate of an environment, influencing on elements of RM, by $M \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$ and $N \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$. May there be K metastates by $K \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$. Denote the set of alternatives by $X = \{x_i\}_{i=1}^{M}$. Then r_{ijk} is the risk at the j-th state in the k-th metastate when the alternative x_i is selected. Formally, the finite change of RM can be substituted with the risk $M \times N \times K$ matrix.

Probabilistic measures are unavailable

This is the most pessimistic case relating to the classical minimax approach [3, 4, 8, 9]. It does not rely, however, on any statistics, because

$$X^* = \arg \min_{x_i,\, i=\overline{1,M}} \left\{ \max_{j=\overline{1,N}} \max_{k=\overline{1,K}} r_{ijk} \right\} \subset X . \tag{1}$$

OAS by (1) is effective when conditions under which one has to make a decision occur rarely or just a few times [3, 5, 9]. Seemingly, minimaximax by (1) comes severer than the classical minimax approach owing to risks are maximized twice.

Probabilistic measures relating to ordinary states are available

Let $\mathbf{P}_k = \left(p_{ijk}\right)_{M\times N}$ be the stochastic matrix whose value p_{ijk} is the probability of the j-th state at the k-th metastate when the i-th alternative is selected. Obviously,

$$\sum_{j=1}^{N} p_{ijk} = 1 \quad \forall\, i = \overline{1, M} \quad \text{and} \quad \forall\, k = \overline{1, K} . \tag{2}$$

Then

$$X^* = \arg \min_{x_i,\, i=\overline{1,M}} \left\{ \max_{k=\overline{1,K}} \sum_{j=1}^{N} p_{ijk} r_{ijk} \right\} \subset X . \tag{3}$$

OAS by (3) is effective when conditions under which one has to make a decision occur frequently [4].

Only probabilistic measure over metastates is available

Let $\{\mu_k\}_{k=1}^{K}$ be a probabilistic measure over K metastates, so

$$\sum_{k=1}^{K} \mu_k = 1 . \tag{4}$$

Although matrices $\{\mathbf{P}_k\}_{k=1}^{K}$ are unknown, the probabilities $\{\mu_k\}_{k=1}^{K}$ allow to form

$$X^* = \arg \min_{x_i,\, i=\overline{1,M}} \left\{ \max_{j=\overline{1,N}} \sum_{k=1}^{K} \mu_k r_{ijk} \right\} \subset X . \tag{5}$$

OAS by (5) is effective when RM changes frequently [4, 5]. When industrial and manufacturing labor risks are evaluated, this case is much more probable than availability of probabilistic measures in matrices $\{\mathbf{P}_k\}_{k=1}^{K}$ by (2). Nonetheless, evaluation of $\{\mu_k\}_{k=1}^{K}$ by (4) is a separate problem.

Probabilistic measures relating to ordinary states and the probabilistic measure over metastates are available

In this case, OAS

$$X^* = \arg \min_{x_i,\, i=\overline{1,\,M}} \left\{ \sum_{k=1}^{K} \mu_k \sum_{j=1}^{N} p_{ijk} r_{ijk} \right\} \subset X \tag{6}$$

is effective when conditions under which one has to make a decision occur frequently, and RM changes frequently as well. Obviously, this case relies on huge statistics, what is unfeasible for industrial and manufacturing labor risks. OAS by (6), as a consequence, bears a little practical use.

Discussion

In real practice, point evaluation of RM is impossible, so RM is represented as the set of K matrices $\{\mathbf{R}_k\}_{k=1}^{K}$ implying the RM change through this set. Clearly, the neighboring numbered matrices $\mathbf{R}_k$ and $\mathbf{R}_{k+1}$ by $k = \overline{1,\, K-1}$ may have non-changed elements. Matrices $\{\mathbf{R}_k\}_{k=1}^{K}$ can be sorted variously. In a partial case, if $\mathbf{R}_1$ is given,

$$\mathbf{R}_k \in \arg \min_{\mathbf{R}_m,\, m=\overline{k,\,K}} \rho_{M\times N}\left(\mathbf{R}_{k-1}, \mathbf{R}_m\right) \quad \text{for} \quad k = \overline{2,\, K-1} \tag{7}$$

by the distance $\rho_{M\times N}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ in the space of real-valued $M \times N$ matrices $\mathbf{A}$ and $\mathbf{B}$, where matrix $\mathbf{R}_K$ remains itself after matrices $\{\mathbf{R}_k\}_{k=1}^{K-1}$ are known (by their numbers). Otherwise, the metastates' numbers $\{k\}_{k=1}^{K}$ may be obtained after sorted matrices $\{\mathbf{P}_k\}_{k=1}^{K}$ in the same way, i. e. when $\mathbf{P}_1$ is given,

$$\mathbf{P}_k \in \arg \min_{\mathbf{P}_m,\, m=\overline{k,\,K}} \rho_{M\times N}\left(\mathbf{P}_{k-1}, \mathbf{P}_m\right) \quad \text{for} \quad k = \overline{2,\, K-1}. \tag{8}$$

The initial matrix $\mathbf{R}_1$ or $\mathbf{P}_1$ is chosen free. At least, any reasons to take some $\mathbf{R}_1$ or $\mathbf{P}_1$ are going to be specific rather than general.

Conclusion

Here, in (1), (3), (5), (6) a meta-minimax approach is suggested. This is caused with that RM, whose elements are evaluated by experts of the industrial labor safety assurance, cannot be expressed as an ordinary $M \times N$ matrix. An OAS by (1), (3), (5), (6) regards the RM change. Note that this change is finite, not infinite or continuous. Availability of statistics is not excluded, so the rigorous minimaximax (1) can be softened with (3), (5), or (6). An OAS by (3), (5), or (6) corresponds to a meta-BL criterion. Based on minimaximax (1) and meta-BL criterion (3), (5), or (6), a meta-HL criterion may be formalized also. However, this formalization should contain substantiation of how to select two parameters of relying on probabilistic measures in $\{\mathbf{P}_k\}_{k=1}^{K}$ and $\{\mu_k\}_{k=1}^{K}$.

References

1. Li Y. P. A robust interval-based minimax-regret analysis approach for the identification of optimal water-resources-allocation strategies under uncertainty / Y. P. Li, G. H. Huang, S. L. Nie // Resources, Conservation and Recycling. – 2009. – Vol. 54, Iss. 2. – P. 86 – 96.

2. Dong C. An interval-parameter minimax regret programming approach for power management systems planning under uncertainty / C. Dong, G. H. Huang, Y. P. Cai, Y. Xu // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88, Iss. 8. – P. 2835 – 2845.

3. Вальд А. Последовательный анализ / Вальд А. ; [пер. с англ.]. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 328 с.

4. Трухаев Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределённости / Трухаев Р. И. – М. : Наука, 1981. – 258 с.

5. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер ; [пер. с нем.]. – М. : Мир, 1990. – 208 с.

6. Zinodiny S. Bayes minimax estimation of the multivariate normal mean vector under balanced loss function / S. Zinodiny, S. Rezaei, S. Nadarajah // Statistics & Probability Letters. – 2014. – Vol. 93. – P. 96 – 101.

7. Information, Inference and Decision / Ed. by G. Menges. – Dordrecht : D. Reidel Publishing Company, 1974. – 201 p.

8. Yokoyama R. A revised method for robust optimal design of energy supply systems based on minimax regret criterion / R. Yokoyama, K. Fujiwara, M. Ohkura, T. Wakui // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 84. – P. 196 – 208.

9. Moon J. Minimax estimation with intermittent observations / J. Moon, T. Başar // Automatica. – 2015. – Vol. 62. – P. 122 – 133.

Рецензія/Peer review : 22.9.2014 р. Надрукована/Printed :7.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 687.016.(075)

А.Л. СЛАВІНСЬКА
Хмельницький національний університет

ЛОГІСТИЧНА КООРДИНАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ СЕРІЇ МОДЕЛЕЙ ШВЕЙНИХ ВИРОБІВ

В статті представлена методика оперативного планування конструктивно-технологічних властивостей нових моделей виробу з метою оптимального управління інформаційними потоками в процесах конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. Розроблені проектні модулі підпорядкованості конструктивних, технологічних і композиційних ознак з урахуванням синергетичних зв'язків адаптивної системи «людина – виріб». Запропоновані оператори контролю матриці сполучуваності функціональних вузлів систематизованого асортиментного ряду.

Ключові слова: інформаційні потоки, конструктивно-технологічні властивості, робоча документація, проектний модуль, синергетичні зв'язки, матриця сполучуваності, функціональний вузол, оператор контролю, компоновка, систематизований асортиментний ряд.

A.L. SLAVINSKA
Khmelnytsky National University

LOGISTICAL COORDINATION OF THE INFORMATION FLOWS OF THE MODELS GARMENTS SERIES

Abstract - This work presents the method of operational planning of the structural and technological properties of new garment style in order to optimize information flows in the design process and technological preparation of production. Subordination modules of the design, technological and compositional characteristics with accounting the synergy of the adaptive system «human - garment» are developed. These modules are based on objects systematization of working documents. The reasons for the inability to provide high quality of the automated layout system of the structural and technological modules of the functional models' units were analyzed. Psychological factor of the automated layout system's errors and the reasons of the absence of the information flow coordination in order to apply methods were considered. The combinatorial ability method based on the stepwise considering of the compatibility matrix of the structural and technological characteristics of the functional garments units. The monitoring operators of the coordination between the functional-aesthetic indicators of the models code and the systematic assortment row requirements are offered. Final stages of the algorithmic gaming space of the information flows for the composing of the models series were described.

Keywords: *information flows, constructive - technological properties, working documentation, the project module, synergy, compatibility matrix, functional node, monitoring operator, composing, systematized assortment row.*

Вступ

Інженерна підготовка сучасного швейного виробництва реалізується через концепцію інтенсифікації і постановки нових моделей на потік масового виробництва. Асортиментна політика підприємства повинна враховувати стадії життєвого циклу продукції у виборі структури асортименту, зокрема, орієнтації на модифікацію умовного виробу асортиментної групи [1]. Розгляд модельної конструкції як певної комбінації групових елементів узагальненої моделі типового представника, створює передумови управління інформаційними потоками в агрегатуванні складових частин для автоматизованої компоновки моделей у вигляді систематизованого асортиментного ряду.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Методика модуля «Технічний рисунок» комп'ютерної системи МИКС – Р забезпечує створення технічних ескізів нових моделей, каталогу моделей підприємства, створення і ведення бази даних за моделями в цілому і за їх конструктивними елементами та збереження базових елементів [2]. Проте не передбачена функція однотипності ліній членувань для перебору варіантів модифікації основних деталей.

Методики САПР «Грація», Julivi [3] містять модуль технічного моделювання базової основи, але не дозволяють успеціалізувати комбінацію групових елементів додаткових членувань в модифікаційних перетвореннях деталі через недостатність параметричних ознак технологічної однорідності елементів.

Концепція функціонального забезпечення розробки модифікаційного ряду реалізується через управління інформаційними потоками, задіяних в процедурах параметризації блочно-модульних елементів типових конструкцій [2, 4].

На оптимізацію виробничої реалізації промислової колекції впливає система інформаційного забезпечення планування асортиментної колекції, яка через упорядкування ознак конструктивно-технологічних властивостей виробу, утворює ланцюг «асортиментна серія – асортиментний комплекс – асортиментний ряд» [1, 5]. Вибір засобів розроблення кожної системи визначається методикою компонування структурних елементів об'єкта проектування.

Мета і завдання досліджень

Мета дослідження – розробка методики компоновки систематизованого асортиментного ряду в умовах швейного підприємства.

Завдання дослідження:

- виконати логістичну координацію застосування інформаційних масивів конструктивно-технологічних властивостей об'єкту проектування;
- розробити спосіб виключення помилок автоматизованої компоновки моделей систематизованого асортиментного ряду.

Виклад основного матеріалу

В основу вибору засобів модифікаційних перетворень у відповідний тип системи моделей закладені етапи послідовної деталізації проектних рішень.

Алгоритм етапів застосування інформаційних масивів об'єкта компоновки забезпечується дотриманням наступних умов:

- доцільно, щоб класифікаційні ознаки сучасних швейних виробів за умовами експлуатації та призначенням були спільними для деталізації конструктивно-технологічних рішень варіантів складових частин;
- доцільно, щоб методика містила назви складових частин виробу відповідно до термінології нормативної документації;
- доцільно, щоб опис складального комплексу містив структурні елементи пакету матеріалів в конструкції з'єднання;
- доцільно, щоб класифікаційні елементи формоутворення утворювали геометричний контур деталі з включенням плоских конструктивних зон;
- доцільно, щоб функціональні конструктивні елементи утворювали складальну одиницю оброблюваної деталі;
- доцільно, щоб основні деталі виробу з'єднувались між собою межовими лініями контуру деталі;
- доцільно, щоб поздовжні і поперечні лінії утворювали систему типових членувань основних деталей виробу;
- доцільно, щоб карта кодування конструктивно-технологічних властивостей виробу забезпечила запис коду загального графа моделі за результатами компоновки.

Для уникнення помилок в підготовці вхідних даних, за результатами аналізу інформаційних масивів, задіяних в структурі складових частин виробу, підготовлено глосарій термінів, задіяних в процедурах модифікування асортиментного ряду.

Глосарій об'єктів робочої документації (табл. 1) містить нормативне визначення властивостей складових частин за спільністю біфункціональних перетворень рівнів ієрархії «деталь↔складальна одиниця↔складальний комплекс↔виріб» та відмінністю морфологічної характеристики конструктивного стану об'єкта проектування, за допомогою яких визначається виправданість вибору конструктивно-технологічного рішення.

Градація конструктивних станів об'єктів проектування описується конструктивними переходами послідовної деталізації проектних рішень за такими показниками як поверхня деталей, габарити деталей, конфігурація зрізів [1].

Таблиця 1

Глосарій ключових термінів проектної документації на швейний виріб

Ключовий термін	Визначення понять	Диференціація понять
1	2	3
1. Асортимент	Склад і співвідношення окремих видів виробів в продукції підприємства, галузі або в якійсь групі товарів [6]	Асортиментна концепція [2]. Асортимент одягу [5]. Асортиментна група [5]. Асортиментна одиниця [5].
2. Виріб	Будь-який предмет або набір предметів, що виробляють на підприємстві [7]	Виріб: оригінальний; типовий; базовий; модифікований; змодифікований; розспецифікований; уніфікований [2]. Складова частина; деталь; складальна одиниця; комплекс; комплект [2, 4].
3. Властивість	Категорія предмету, яка обумовлює його відмінність або спільність з іншими предметами і проявляється в його відношенні до них [6, 9]	Властивість одягу [4]. Ознаки існуючої властивості: категорія [1]; предмет [2]; технологія [2]; показник [7].
4. Колекція	Систематизоване зібрання однорідних предметів [5]	Колекція моделей [5]. Колекція – адресна, асортиментна, промислова [1, 5]. Система моделей [5]. Асортиментна серія [2, 4, 5]. Асортиментний комплекс [1]. Асортиментний ряд [1, 4]. Промислова серія [1].

Продовження табл. 1

1	2	3
5. Конструкція	Сукупність властивостей виробу, які характеризують склад його частин, призначення, взаємне розташування, форму, розміри і матеріали складових частин та види з'єднання їх між собою [6]	Технічна структура виробу [5]. Базова основа [1, 3, 5]. Основа конструкції [5]. Конструкція: типова; базова типова; базова; вихідна модельна; модельна; модельна серійна; уніфікована; силуетна, типізована [1,5].
6. Крій	Характеристика видів членувань поверхні на складові частини [7]	Крій одягу [2]; крій рукава [2, 4]; засоби членувань [4, 5]; основні функціональні частини [2]; додаткові функціональні частини [4].
7. Лінія	Спільна частина двох суміжних областей поверхні [6]	Контур [6]. Лінії: силуетні; конструктивні; конструктивно-декоративні; декоративні; технологічні [5, 10]; базові; модельні; модифікаційні [4].
8. Модель	Виріб, який відтворює або імітує конкретні властивості даного виробу, призначений для перевіряння його дії та визначання певних характеристик [6]	Зразок; зразок-еталон [2, 4, 7, 9]. Ескіз моделі [2, 10]: творчий, технічний [5]. Модель виробу [2]: аналог; ідея; пропозиція [2, 4, 5]; базова; узагальнена; авторська [5].
9. Композиція	Об'єднання всіх елементів форми об'єкта в одне ціле [10]	Категорії композиції [10]. Засоби композиції [10]. Силует: базовий, основний, похідний [2, 4, 5]. Тектоніка, архітектоніка [10]; гармонізація [9].
10. Процес	Сукупність послідовних дій для досягнення певного результату [6]	Процес: виробничий; технологічний; одиничний технологічний; типовий технологічний; груповий технологічний; типовий груповий технологічний [6, 7]. Проектування; моделювання; модифікування; уніфікація [5, 6]. Операція: проектна, технологічна, оброблення [4, 5].

Логістичну координацію даних для компоновки моделей асортиментної серії забезпечує інформаційна модель структурних рівнів конструктивно-технологічних властивостей виробу (табл. 2).

Класифікатор продукції швейної промисловості забезпечує скорочене позначення виробів у вигляді взаємопов'язаної системи кодування, у якій перші дві цифри 85 – це номер «Вироби швейні». Решта вісім цифр послідовно конкретизують спільні ознаки – умови експлуатації та призначення [5]. Оператор контролю виду асортименту жорстко фіксує рівні: призначення, асортиментна група, асортиментна одиниця. Наприклад, 1.2.2:

1 – побутовий одяг; 1.2 – костюмно-платтяний асортимент; 1.2.2 – жакет.

Отже, нульовий рівень інформаційної моделі – сфера застосування, фіксує стабільну інформацію про асортимент. Рівні 1–8 інформаційної моделі деталізують структурні елементи конструктивного утворення виробу. Класифікаційні ознаки розподілу дозволяють визначити рівневу характеристику об'єкта компоновки за типом застосування, призначення – за показниками тотожності або близькості властивостей об'єкту модифікаційного перетворення в ході виконання проектних операцій.

Інформаційні масиви представлені сукупністю інформаційних потоків морфологічних ознак, задіяних у формуванні проектного образу.

Виділення конкретного варіанту узагальненої декомпозиції класифікаційної ознаки структурних рівнів 1 – 8 ґрунтується на синергетичних зв'язках методу структурного синтезу за принципом І – АБО [11].

Теоретична модель синергетичних зв'язків одягу як предмета П має суспільну цінність за призначенням – А і множину елементів матеріально-просторової структури – М. Тобто, спосіб побудови об'єкта проектування в автоматизованій компоновці базується на принципі від морфології до функції.

Аналіз комбінаторної здатності ознак конструктивно-технологічних властивостей містить ранжування еталонних рядів ситуаційних аналогів корисної функції у вигляді проектних модулів.

Конструктивні і технологічні ознаки характеризують морфологію предмета, композиційні – суспільну функцію.

Інформаційні потоки проектного модуля конструктивних ознак спрямовані на конструкцію виробу

(рис. 1), технологічних ознак – на технологію виготовлення (рис. 2), композиційних – на виявлення типічних тектонічних структур та логіки ритмічної будови форми (рис. 3).

Таблиця 2

Інформаційна модель структурних рівнів конструктивно-технологічних властивостей швейного виробу

Інформаційний масив	Структурний рівень	Класифікаційні ознаки	
		розподілу	призначення
Сфера застосування	0	Клас, підклас, вид, група, підгрупа	Асортимент, асортиментна група, базова асортиментна одиниця, модельна асортиментна одиниця
Умовний тип конструкції	1	Плечовий	Тип пальта, Тип пелерини
		Поясний	Тип спідниці, Тип штанів
		Об'єднаний	Тип комбінезона
Структурні ознаки форми	2	Базові форми Похідні форми Основні силуетні форми	Членування форми, силует, крій
Основні складові частини конструкції	3	Основні функціональні частини: функціональні вузли основних деталей	Типові деталі членувань
Основні елементи формоутворення деталей конструкції	4	Типи геометричних моделей утворення об'ємної форми одягу	Шви, виточки, ВТО, сітьові кути, комбінаторні
Лінії членувань	5	Конструктивні, конструктивно-декоративні, декоративні, технологічні	Крайові, внутрішні, базові, модельні
Геометрія контуру	6	Конфігурація: прямолінійна, криволінійна, комбінована	За напрямом розташування: поздовжня, поперечна, навскісна, комбінаторна. Розміри зрізу, площа
Додаткові складові частини (функціонально декоративні елементи ФДЕ)	7	Складальні комплекси функціонально декоративних вузлів	Складальні одиниці оформлення крайових ліній основних деталей, функціональні вузли поверхні деталей
Засоби оздоблення (додаткові декоративні елементи ДЕ)	8	Декоративні елементи. Технологічні елементи. Додаткові деталі	Розміри, місце розташування, техніка виконання.

Нульовий рівень структуризації інформаційних потоків кожного проектного модуля містить характеристики асортименту, формоутворення, цільової функції (рис. 1–3). Диференція властивостей нульового рівня визначає підпорядкованість параметричних ознак в переходах на інші рівні як по вертикалі, так і по горизонталі.

Для формалізації інформаційних потоків прийнята гіпотеза, що назви інформаційних масивів характеризують групи конструктивно-технологічних властивостей складальних одиниць у вигляді функціональних вузлів. Число функціональних вузлів складається з трьох груп – вузли основних формоутворюючих деталей, вузли додаткових формоутворюючих деталей, вузли декоративних елементів.

Оперативне планування етапів конструкторсько-технологічної підготовки виробництва передбачає використання адаптивної системи ігрових просторів проектних модулів з метою обмеження інформаційних масивів, не знижуючи ефективності нових морфологічних структур об'єкта проектування у вигляді серії моделей.

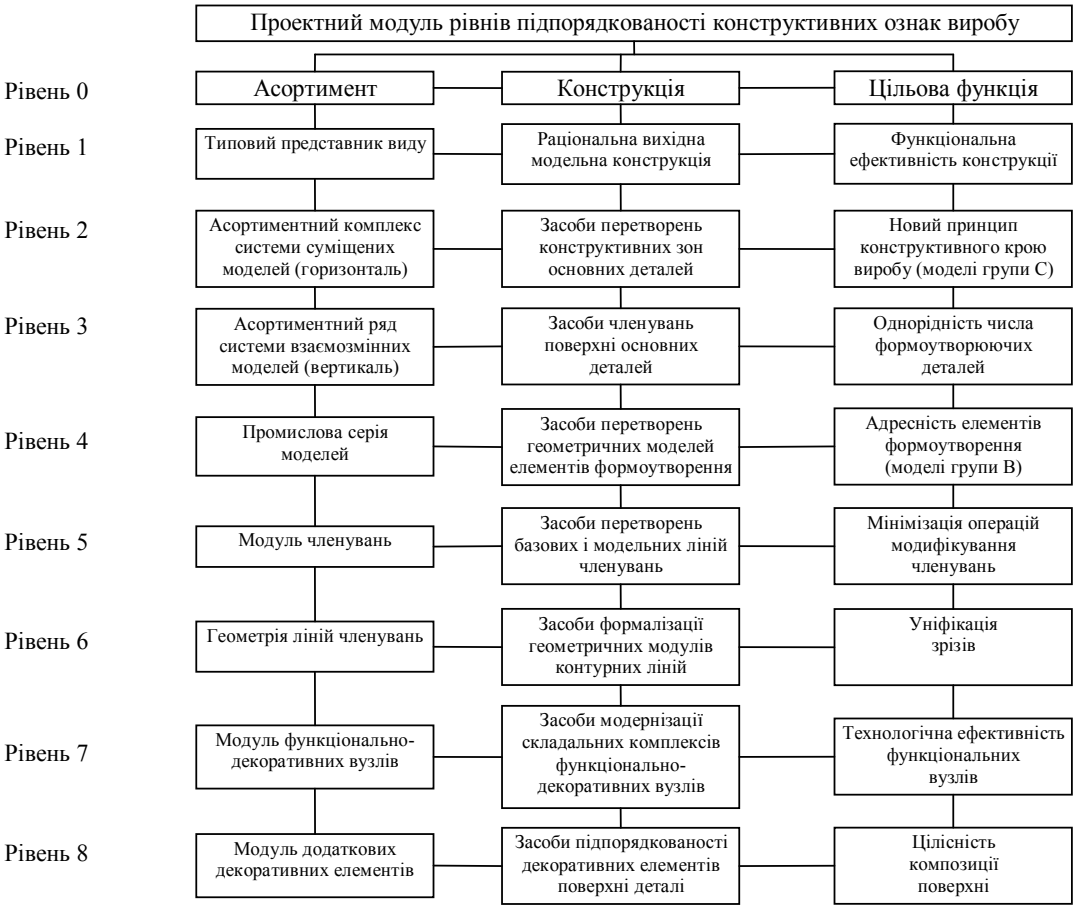


Рис. 1. Модель координації синергетичних зв'язків в інформаційних потоках конструктивних властивостей швейного виробу

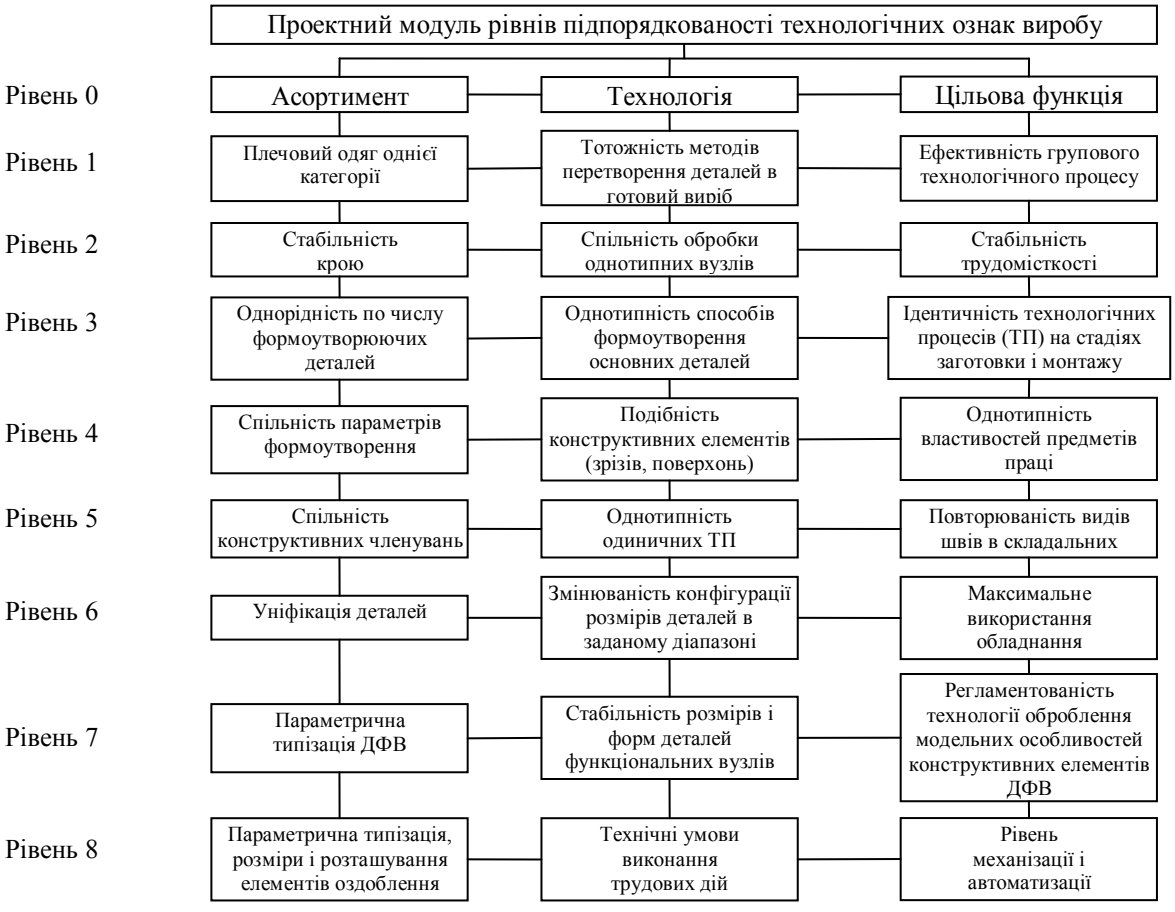


Рис. 2. Модель координації синергетичних зв'язків в інформаційних потоках технологічних властивостей швейного виробу

Рис. 3. Модель координації синергетичних зв'язків в інформаційних потоках композиційних властивостей швейного виробу

Ефективність компонування класифікаційних ознак конструктивно-технологічних властивостей нового виробу забезпечує операційний склад з'єднувальних елементів на рівнях поверхня деталей – габарити деталей – конфігурація зрізів, заданих різновидами композиційного рішення окремих конструктивно-технологічних властивостей ОККР функціонального вузла (рис. 4).

Код вузла	Найменування функціонального вузла	Код ОККР	Класифікаційна ознака

Рис. 4. Форма карти кодування класифікаційних ознак складових функціонального вузла

Ефективність процедур автоматизованої компоновки ОККР забезпечують основні властивості ігрового простору: обмеженість, структурність, неперервність, однотипність, ахіральність.

Обмеженість здійснюється шляхом визначення числа функціональних вузлів, що характеризують умовний базовий виріб, який виявлено шляхом підрахунку повторюваності основних складових частин.

Структурність представлена спільністю конструктивно-технологічних ознак основних функціональних вузлів у переліку варіантів.

Неперервність характеризується збереженням наскрізного запису коду функціонального вузла в коді моделі.

Однотипність додаткових функціональних вузлів характеризується ідентичністю технологічних властивостей серії виробу.

Ахіральність характеризує нетотожну однотипність додаткових ознак композиційного виробу.

Множина функціональних вузлів визначає розмір матриці варіантного компонування ОККР (рис. 5).

Код вузла	Код ОККР	1	…	*n*
		1…*n*	.	1…*n*

Рис. 5. Форма матриці перебору варіантів ОККР
Сумісність пари з'єднувальних елементів позначається символом 1, несумісність – символом 0

Засобом здійснення переходу на модифікаційний рівень моделей асортиментного ряду служить оператор контролю операцій суміщення множини функціональних вузлів.

Заданий розмір матриці називається областю Р попередніх конструктивно-композиційних рішень. До області Р належать такі варіанти ККР, які відповідають вимогам формування асортиментної серії у вигляді заданої системи моделей (суміщувані – асортиментний комплекс, рівень 3), (взаємозмінні – асортиментний ряд, рівень 4).

Комбінаторна здатність ОККР в поелементному складанні модельної конструкції оцінюється валентністю, яка визначена кількістю інформаційних масивів властивостей множини ФВ. Оптимальне число 8 визначає розмір загальної матриці ФВ 8×8.

Вихідний стан предметів праці, деталей крою, в процесі виготовлення виробу, задають сукупністю конструктивних елементів (зрізи, поверхня). Отже, для всіх деталей виробу валентність дорівнює 8, де 4 – зрізи обмеження поверхні та 2 – точки склеювання в замкнутий контур.

Функціональні вузли (ФВ) будь-якого виробу повинні бути однотипними за основною функцією як в загальній матриці компонування, так і в структурній матриці елементів ККР.

Таким чином, число валентності 8 є оптимальним для різновидів варіантів ФВ.

Елементарна матриця бульової ситуації має розмір 1×1 (*i*-й елемент ОККР з'єднується з *j*-м елементом ОККР наступного вузла). Мінімальна структурна матриця має розмір 2×2, що обумовлено умовою наявності не менше двох альтернатив рішення ОККР [1]. Загальна максимальна матриця 8×8×8 містить 512 варіантів компоновки. Розрідженість матриці обумовлює відсутність сполучень (символ 0), що впливає на число сполучень в рядках і стовпцях [11].

Використання валентності є оператором контролю розміру матриці.

Логіка пошуку одиничного графа для формування ланцюга узагальненого графа ґрунтується на покроковому розгляді структури ФВ в процесі вибору одного елемента.

Задіяні наступні оператори контролю:

$\forall_1$ – оператор членування структури виробу на ФВ.

$\forall_2$ – оператор вибору елемента ОККР із заданими властивостями в структурі ФВ.

Спосіб виключення помилок функціонально-естетичної відповідності моделей систематизованого асортиментного ряду (САР) містить два етапи перевірки результатів автоматизованої компоновки.

Перший етап – перевірка однотипності різновидів моделей за ознаками стильового комплексу (силуетні лінії, знаковість композиційних елементів) для визначення кількості базових типів моделей.

Другий етап – оцінка рівня однорідності ОККР в кодовій характеристиці моделей САР шляхом визначення коефіцієнтів однорідності.

Коефіцієнт конструктивної однорідності $K_{к.о.}$ визначається за формулою [5]:

$$Кк.о. = \frac{\sum m_{ij}}{\sum M_{ij}}, \quad (1)$$

де $\sum m_{ij}$ – сумарне число однотипних конструктивних ознак в *i*-й і *j*-й моделях;

$\sum M_{ij}$ – сума всіх конструктивних ознак в *i*-й та *j*-й моделях.

Технологічна однорідність моделей визначається за формулою [5]:

$$K_{с.о.} = \frac{\sum c_{ij}}{\sum C_{ij}}, \quad (2)$$

де $\sum c_{ij}$ – сума балів технологічно однорідних операцій в *i*-й та *j*-й моделях;

$\sum C_{ij}$ – сума балів усього набору технологічних операцій в *i*-й та *j*-й моделях.

Кількість технологічних операцій визначається технологічною обробкою моделей. Розрахунки виконуються в парах моделей. Ефективність виробництва моделей САР оцінюється коефіцієнтом відповідності кінцевих властивостей моделей промислової серії вимогам проектування технологічного процесу їх виготовлення:

$$K_e = \frac{K_{к.о.}}{K_{т.с.}} \quad (3)$$

Чим ближче значення K_e до одиниці, тим оптимальнійший оператор вибору варіантів поєднань в промислову серію із моделей САР за обраним напрямком кроків поєднань.

Для автоматизованої компоновки варіантних моделей САР використовується програма «Матриця» розроблена автором.

Висновки

1. Оптимальне управління інформаційними потоками координації оновлення модельного ряду асортименту підприємства базується на синергетичних зв'язках складових системи «модель виробу – цільова функція».

2. Алгоритм застосування інформаційних масивів конструктивно-технологічних рішень моделей виробу в автоматизованій компоновці містить оператори виключення помилок у виборі сполучень окремих класифікаційних ознак.

3. Основні властивості ігрового простору компоновки ОККР визначають вектор вибору моделей промислової серії за ознаками відповідності виготовлення в груповому технологічному процесі.

Література

1. Славінська А. Л. Метод оптимізації конструктивно-технологічних ознак систематизованого ряду серії моделей швейних виробів / А. Л. Славінська // Вісник Хмельницького національного університету.

Технічні науки. – 2015 – № 2. – С. 45 – 49.

2. Славінська А. Л. Побудова лекал деталей одягу різного асортименту : навчальний посібник / А. Л. Славінська. – Хмальницький : ХНУ, 2011. – 222 с.

3. Кудрявцева Н.В. Системи автоматизованого проектування одягу : навчальний посібник / Н.В. Кудрявцева, О.А. Дітковська. – Хмельницький : Видавець ПП Заколодний М.І., 2014. – 204 с.

4. Сушан А. Т. Інженерне проектування швейних виробів : навчальний посбник / А. Т. Сушан. – К. : Арістей, 2005. – 172 с.

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

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

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

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

9. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення : ДСТУ 3278 – 95. – К. : Укрдежстандарт, 1996. – 7 с.

10. Пармон Ф.М. Композиция костюма : учебник для вузов / Ф.М. Пармон. – М. : Легпромбытиздат, 1985. – 264 с.

11. Славінська А. Л. Метод структурного синтезу конструктивно-уніфікованих рядів модельних конструкцій одягу / А. Л. Славінська // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2006. – № 2. Т. 1. – С. 119– 122.

Рецензія/Peer review : 26.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 677.047.622.112.2

Ю.В. КОШЕВКО
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ВІДФОРМОВАНИХ ДЕТАЛЯХ ГОЛОВНИХ УБОРІВ ГІДРОВІДЦЕНТРОВИМ СПОСОБОМ

Ефективність гідровідцентрового способу формування характеризується стійкістю відформованої проби в часі. Встановлено релаксацію отриманих форм з різних матеріалів за властивостями та призначенням. Досліджено вплив головних факторів процесу на якість формування.

Ключові слова: формування, відцентрові зусилля, головки головних уборів, фактори процесу формування, динамічні методи формування.

Y.V. KOSHEVKO
Khmelnytsky National University

RESEARCH RELAXATION PROCESSES IN A MOLDED DETAILS HATS HYDRO-CENTRIFUGAL METHOD

Efficiency hydro-centrifugal method of forming a molded sample is characterized by stability over time. Established relaxation derived forms of different materials on the properties and purpose. The influence of the main factors in the quality of the process of formation.

Keywords: forming, centrifugal efforts, heads of head-dresses, factors of process forming, dynamic methods of forming.

Постановка проблеми

Однією з особливостей текстильного матеріалу є релаксаційні процеси, які виникають при деформації, та зумовлені його структурними характеристиками. Вони значною мірою визначають експлуатаційні властивості швейних виробів в цілому [1].

Формостійкість одягу в цілому і окремих його частин визначається вибраними способами формування та формозакріплення. Формостійкість є найважливішим показником якості виробів, але до теперішнього часу так і не існує єдиного критерію оцінки формостійкості.

Здатність текстильного матеріалу до релаксаційних відновлювальних процесів значною мірою залежить від його пружності. На дану властивість тканини впливають: природна жорсткість волокон; структура пряжі і ниток – зі зростанням товщини і ступеня кручення (пряжі, нитки) жорсткість зростає; збільшення товщини та щільності призводить до збільшення жорсткості; від переплетення: при скороченні довжини перекриттів в переплетені жорсткість також зростає. Спосіб отримання об'ємної форми швейного виробу і його якість в значній мірі залежить від стійкості деформацій в часі за рахунок яких вона отримана.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Критерієм оцінки стійкості форми прийнято вважати релаксацію – деформацію того, або іншого виду після формування з часом, а також в результаті різних дій на сформований зразок. Релаксаційні

процеси матеріалу зумовлені виникненням у них еластичної деформації, за рахунок високомолекулярної будови текстильних волокон, в яких молекули не розпрямлені (скручені) і мають довжину в тисячу разів більше діаметра. Дана деформація не призводить до стійкої рівноваги і з часом волокно майже повністю повертається до вихідних розмірів, причому спочатку повернення до початкової форми відбувається інтенсивніше, а потім затухає.

Складність та заплутаність взаємного розміщення волокон у текстильному матеріалі, і як наслідок, і їх силової взаємодії не дозволяє волокнам, що залишилися в пружному стані після припинення дії формувального зусилля повернутися в попередній стан, але в подальшому додаткова дія волокон, які отримали пружну деформацію, на волокна, що набули високоеластичної деформації, прискорила релаксаційний процес в останніх.

В процесі експлуатації, одяг випробовує різноманітні динамічні дії з боку тіла людини, які через їх різну інтенсивність на окремих ділянках, необоротно змінюють форму поверхні одягу. Це відбувається з причини релаксаційних процесів, які діють в сформованих деталях, що в результаті приводить до втрати зовнішнього вигляду [2, 3].

Формулювання мети статті

В процесі експлуатації під дією деформуючих навантажень деталі релаксують і втрачають надану форму. Стійкість форми визначається стійкістю тих деформацій, за рахунок яких отримана форма виробів. Тому метою роботи є дослідження релаксаційних процесів у відформованих деталях головних уборів гідровідцентровим способом.

Виклад основного матеріалу досліджень

Оскільки процес гідровідцентрового формування відбувається у РАРС, що пов'язано з певними особливостями, а саме релаксаційні процеси проходять з більшою швидкістю. Це пояснюється тим, що РАРС, в якому знаходиться текстильний матеріал, пластифікує його та прискорює процес релаксації, тобто деформування та відновлення попередніх розмірів [4].

Визначення релаксації, тобто стійкості форми відформованих деталей головних уборів із текстильних матеріалів у часі здійснено згідно методики оцінки якості процесу формування деталей [3].

На плоску деталь за допомогою шаблону наносять контрольну точку, яка знаходиться в центрі деталі. Після здійснення процесу формування деталь розташовують на спеціальній платформі мікроскопу ОПТА № 8502 та фіксують висоту даної точки. Оцінку якості формування виконують відразу після зняття з формувального елемента та через 1, 6, 12, 24 і 48 годин відпочинку за нормальних умов (температура -18°С, вологість – 60%), що дозволяє дослідити релаксаційні процеси [3].

Таблиця 1

Результати дослідження релаксаційних процесів у відформованих деталях з пальтової тканини арт. 3506

№ п/п	Фактори			Висота стріли прогину, мм						Зменшення висоти проби під час релаксації	
				Час релаксації, год.							
	x_1	x_2	x_3	0	1	6	12	24	48	мм	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	12	18	138	37,3	36,4	36,0	35,7	35,5	35,5	1,8	4,8
2	12	18	102	37,0	36,0	35,6	35,4	35,3	35,2	1,8	4,9
3	12	15	138	36,3	35,3	34,7	34,0	33,6	33,6	2,7	7,4
4	12	15	102	35,7	34,5	34,0	33,7	33,5	33,5	2,2	6,2
5	9	18	138	36,9	36,1	35,8	35,5	35,3	35,2	1,7	4,6
6	9	18	102	36,7	36,5	36,2	35,7	35,5	35,5	1,2	3,3
7	9	15	138	35,1	33,8	33,2	32,6	32,5	32,5	2,6	7,4
8	9	15	102	35,6	33,9	33,0	32,5	32,6	32,5	3,1	8,7
9	8	16,5	120	35,5	33,6	33,1	32,9	32,7	32,7	2,8	7,9
10	13	16,5	120	37,1	36,7	36,4	36,0	35,8	35,8	1,3	3,5
11	10,5	14	120	35,3	33,5	33,0	32,5	32,5	32,5	2,8	7,9
12	10,5	19	120	36,9	36,3	36,0	35,7	35,7	35,7	1,2	3,3
13	10,5	16,5	90	35,7	34,5	33,7	33,0	32,6	32,5	3,2	9,0
14	10,5	16,5	150	36,3	35,4	34,9	34,7	34,5	34,5	1,8	5,0
15	10,5	16,5	120	36,0	35,5	35,2	35,0	34,8	34,8	1,2	3,3

З таблиці 1 за раціональними параметрами процесу гідровідцентрового формування побудовано діаграму зміни висоти деталі у процесі релаксації пальтової тканини арт. 3506

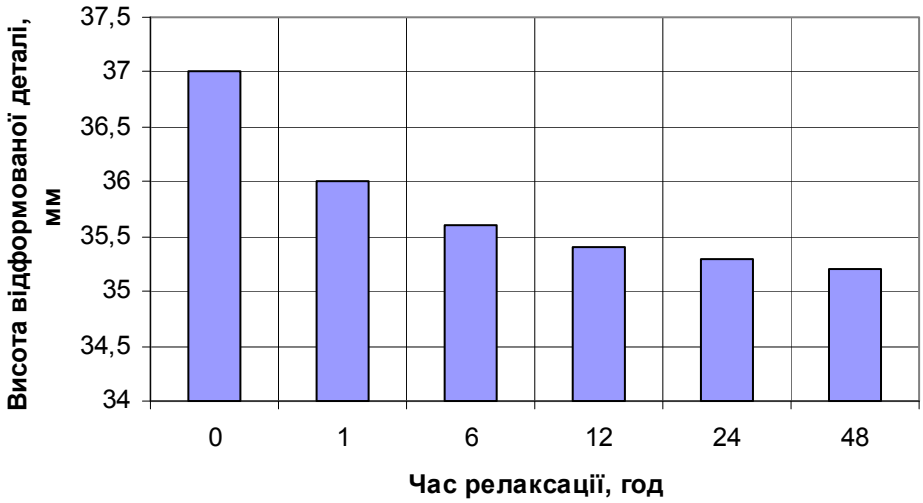


Рис. 1. Зміна висоти відформованої деталі у процесі релаксації при раціональних параметрах гідровідцентрового способу формування пальтової тканини арт. 3506

У результаті досліджень релаксаційних процесів (таблиця 1, рисунок 1) встановлено, що незначна частка релаксації відформованої деталі з пальтової тканини арт. 3506 (7,2 % від загальної частки релаксації) спостерігається на протязі першої години релаксації. Далі зменшення розмірів деталей на проміжку часу від 1 до 6 годин складає 3%. Визначено, що після 24 годин відпочинку в нормальних умовах релаксаційні процеси практично зупиняються (1÷2%).

Таблиця 2

Результати дослідження релаксаційних процесів у відформованих деталях з костюмної тканини арт. 55023

№ п/п	Фактори			Висота стріли прогину, мм						Зменшення висоти проби під час релаксації	
				Час релаксації, год.							
	x_1	x_2	x_3	0	1	6	12	24	48	мм	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	12	18	138	35,8	34,1	33,7	33,3	32,7	32,5	3,3	9,2
2	12	18	102	35,0	34,0	33,6	33,0	32,1	32,0	3,0	8,6
3	12	15	138	35,3	33,7	33,0	32,6	31,3	31,3	4,0	11,3
4	12	15	102	34,8	32,8	31,5	30,6	30,2	30,1	4,7	13,5
5	9	18	138	34,8	34,0	33,6	33,3	33,1	33,0	1,8	5,2
6	9	18	102	34,0	33,1	32,5	32,0	31,7	31,5	2,5	7,4
7	9	15	138	34,8	34,1	33,6	33,2	33,0	33,0	1,8	5,2
8	9	15	102	34,3	33,0	32,2	31,0	30,7	30,7	3,6	10,5
9	8	16,5	120	34,2	33,2	32,7	32,5	32,1	32,0	2,2	6,4
10	13	16,5	120	36,3	34,8	33,0	32,4	32,0	32,0	4,3	11,8
11	10,5	14	120	33,0	32,1	31,0	30,4	30,2	30,0	3,0	9,1
12	10,5	19	120	36,3	35,3	34,7	34,4	34,2	34,0	2,3	6,3
13	10,5	16,5	90	33,8	33,0	32,4	32,0	31,5	31,5	2,3	6,8
14	10,5	16,5	150	35,4	34,4	33,7	33,4	33,1	33,0	2,4	6,8
15	10,5	16,5	120	34,8	33,5	33,0	32,5	32,2	32,0	2,8	8,0

З таблиці 2 за раціональними параметрами процесу гідровідцентрового формування побудовано діаграму зміни висоти деталі у процесі релаксації костюмної тканини арт. 55023

Аналогічно проведено дослідження з групою костюмних тканин, приведені результати експериментальних досліджень (таблиця 2, рисунок 2) встановлено, що значна частка релаксації деталі з костюмної тканини арт. 55023 (4 % від загальної частки релаксації) спостерігається на протязі першої години релаксації. Зменшення розмірів деталей на проміжку часу від 1 до 6 годин складає 7 %. Встановлено, що після 24 годин релаксаційні процеси практично зупиняються (1÷2%).

Отримані дані зміни висоти стріли прогину відформованих деталей у часі (таблиці 1, 2) свідчать, що значна частина релаксації деталей припадає на перші шість годин відпочинку та практично завершується після 24-годинного відпочинку, при цьому якість відформованих деталей головних уборів за показником стійкості форми у часі відноситься до високого рівня. Швидкість протікання релаксаційних процесів практично однаковий при різному поєднанні вхідних факторів.

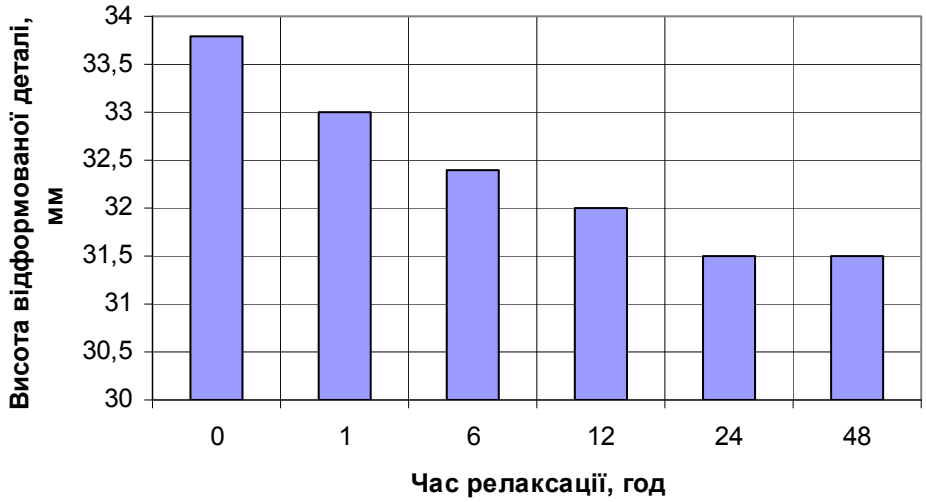


Рис. 2. Зміна висоти відформованої деталі у процесі релаксації при раціональних параметрах гідровідцентрового способу формування костюмної тканини арт. 55023

Найбільший вплив на релаксацію здійснює фактор об'єм РАРС, оскільки зі збільшенням вологовмісту текстильного матеріалу, покращуються його деформаційні властивості, виникає набухання волокон та змінюється їх розміщення у структурі матеріалу в поєднанні з формувальним зусиллям і як наслідок спостерігається найменша релаксація.

Різниця в отриманих результатах для пальтової та костюмних тканин, викликана відмінністю у волокнистому складі та різними структурними характеристиками будови тканин.

Аналізуючи результати релаксаційних процесів можна зробити висновок, що найменша релаксація спостерігається у пальтовій тканині арт. 3506, що обумовлено волокнистим складом (100% вовна). Проведені дослідження дозволили визначити що найбільше значення релаксації спостерігається у відформованих деталей з костюмної тканини арт. 55023, оскільки її волокнистий вміст становить 100% нітрон.

Висновки

Проведені дослідження дозволили визначити характер релаксаційних процесів у відформованих деталях з досліджуваних тканин. Різниця в отриманих результатах для пальтової та костюмних тканин, викликана відмінністю у волокнистому складі та різними структурними характеристиками будови тканин. Встановлено, що значна частина релаксації деталей припадає на перші шість годин відпочинку, а практично завершується після 24-годинного відпочинку.

Література

1. Бузов Б.А. Материаловедение швейного производства : учебник для высш. учеб. заведений легкой пром-сти / Б.А. Бузов, Т.А. Модестова, Н.Д. Алыменкова. – М. : Легпромбытиздат, 1986. – 424 с.

2. Меликов Е.Х. Разработка и исследование методов формования деталей одежды : автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук / Меликов Е.Х. – М. : МТИЛП. 1986. – 42 с.

3. Черепенько А.П. Разработка методов проектирования высокоэффективных процессов влажно-тепловой обработки швейных изделий: автореф. дис. на соискание науч. степени докт. техн. наук. – М. : МТИЛП. 1992. – 74 с.

4. Буханцова Л.В. Дослідження впливу адсорбційно-активного середовища на фізико-механічні властивості текстильних матеріалів / Л.В. Буханцова, Ю.В. Коза, М.О. Кущевський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – № 5. – С. 127–131.

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

Рецензія/Peer review : 26.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: к. т. н., проф. Кущевський М.О.

УДК 685.341.86

І.Т. СОЛТИК
Хмельницький національний університет

ЦИФРОВА МОДЕЛЬ І ГЕОМЕТРИЧНИЙ ОБРАЗ УМОВНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ПЛОСКО-ВАЛЬГУСНОЇ СТОПИ ДІТЕЙ ВІКОМ 4,5–10 РОКІВ

Найчастіше до центру ортопедії і травматології звертаються діти віком від 4,5 до 10 років з плоско-вальгусними стопами. Тому постає питання проектування спеціальної колодки і в результаті виготовлення ортопедичного взуття для визначеної патології, що є неможливим без цифрової моделі й геометричного образу умовної середньої плоско-вальгусної стопи дітей.

Ключові слова: стопа дитини, плоскостопість, цифрова модель, геометричний образ, умовна середня стопа.

I.T. SOLTYK
Khmelnytsky National University

DIGITAL MODEL AND GEOMETRIC IMAGE MIDDLE FLAT-VALGUS OF THE FOOT OF CHILDREN AGED 4,5–10 YEARS

Abstract – Almost a third of people who come to the center of Orthopedics and Traumatology, are children aged 4.5 to 10 years with a flat-valgus feet. So the question arises of designing special shoes and as a result of manufacturing orthopedic shoes for a particular pathology which is impossible without research children foots. The design of special pads and as a result making orthopedic shoes for a particular pathology is not possible without digital models and geometric images of conventional medium-valgus flat foot children.

Purpose of this work is to create a digital model and geometric images of the foot, such as the contours of transverse and longitudinal sections, size and print, which approximated by using one of the known methods of contact.

Keywords: the child's foot, flat feet, the digital model, the geometric image, the notional average foot.

Вступ. В результаті аналізу даних обміру стоп, одержаних в Хмельницькому центрі ортопедії і травматології, встановлено, що найпоширенішою патологією у дітей віком від 4,5 до 10 років. які користуються взуттям з розмірами від 170 до 200, тобто це діти 2 підгрупи шкільної групи, виявилась плоско-вальгусна деформація стопи [1]. Проектування спеціальної колодки і в результаті проектування ортопедичного взуття для визначеної патології неможливе без дослідження стоп дітей.

Дискретно-цифрове і геометричне представлення інформації про поверхню стопи дозволяє використовувати її при проектуванні раціональної внутрішньої форми взуття, як традиційним методом, так і автоматизованим з допомогою ЕОМ і засобів машинної графіки. Цифрова модель стопи, яка відображає координати поверхні стопи, її проекції і перерізів, представляється у вигляді таблиць чи масивів, фіксованих на зовнішніх запам'ятовуючих пристроях ЕОМ. Головною умовою, яку повинна задовольняти всяка цифрова модель, в тому числі і цифрова модель умовної середньої стопи (УСС), являється зчитуваність і відтворюваність.

Аналіз досліджень та публікацій. В результаті аналізу зарубіжних та вітчизняних наукових робіт [2–4] виявлено, що використання теоретичних і практичних засад проектування раціонального взуття пов'язано головним чином з дослідженням середньо-типових стоп і застосуванням при обробці результатів випробувань методів математичного аналізу. Успішне вирішення задачі проектування раціональної внутрішньої форми взуття в значній мірі пов'язано з питаннями перетворення формо-розмірів УСС в параметри взуттєвої колодки. Основні положення цього перетворення, які визначають раціональність внутрішньої форми взуття для дорослого населення, опрацьовані достатньо глибоко [2–4]. Однак не всі вони можуть бути перенесені на дитяче ортопедичне взуття. Тому необхідно проводити дослідження в руслі встановлення раціональної внутрішньої форми дитячого ортопедичного взуття.

Отже, метою даної роботи є створення цифрової моделі і геометричного образу стопи, а саме контурів поперечних і повздовжніх перерізів, габариту і відбитка, які апроксимовані з допомогою одного із відомих контактних методів.

Об'єкти й методи дослідження

На основі раніше встановлених в роботі [1] даних, досліджували цифрову модель умовної середньої стопи дитини (УССд) і створювали її геометричний образ із допомогою дискретно-цифрового і геометричного представлення інформації про поверхню стопи.

Постановка завдання

В роботі [1] були визначені перспективи досліджень дітей з плоско-вальгусними стопами з метою проектування спеціальної колодки та, як наслідок, проектування ортопедичного взуття. Тому завданням даної роботи є створення цифрової моделі і геометричного образу УССд з метою перетворення її формо-розмірів у параметри колодки.

Результати досліджень

Цифрову модель і геометричний образ УСС отримували наступним чином. Спочатку створювали цифрову модель загальної плантограми дитячих стоп у відповідності з методом, представленим в роботі [1], рис. 1. При цьому всі виміри здійснювались трьохкратно з послідуючим усередненням результатів. Сумарна

похибка вимірів і розрахунків не перевищувала 2,3%. Отримана цифрова модель плантограми УСС приведена в табл. 1. В подальшому вона буде використана при проектуванні контурів ребра сліду, розгортки сліду колодки 2-ї підгрупи дошкільної групи.

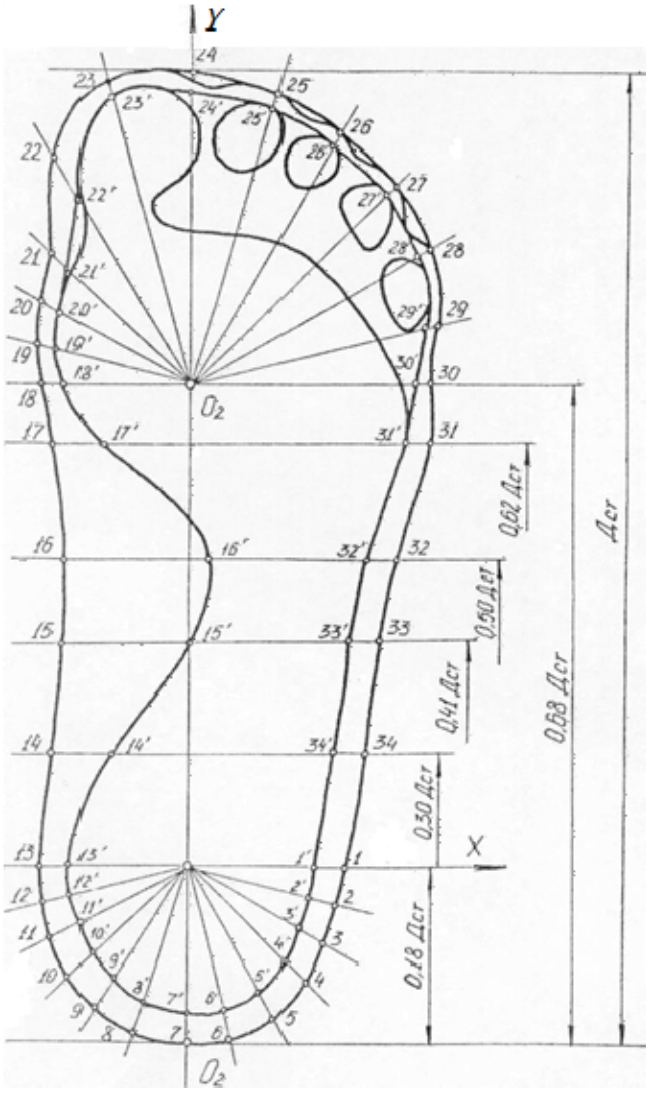


Рис. 1. Отримання цифрової моделі узагальненої плантограми УССд

Цифрова модель поперечних перерізів УССд представлена в табл. 2 у вигляді усереднених полярних координат (радіусів-векторів), значення яких отримані в результаті обмірів стоп на спеціальному приладі [5], виміряних з кроком 10°. Ці дані стануть вихідними даними для аналітичного перетворення формо-розмірів стопи в параметри поперечних перерізів колодки для дітей з плоско-вальгусною деформацією стопи. Використовуючи дану цифрову модель, проводили обводи стандартних поперечних перерізів УСС. На рис. 2 показані контури перерізів УСС з нанесеними сітками радіусів-векторів в полярній системі координат. Контури обводів всіх перерізів апроксимовані радіусо-графічним методом (рис. 3).

Цифрова модель горизонтальних перерізів гомілки на рівнях 70 та 160 мм від площини опори представлена в табл. 3 у вигляді усереднених полярних координат, отриманих на другому етапі досліджень [5] з кроком 10°. Обводи горизонтальних перерізів гомілки і контури цих перерізів, апроксимовані радіусо-графічним методом і показані на рис. 4.

Для формування цифрової моделі поздовжньо-осьового перерізу УСС і гомілки вибираються координати поперечно-вертикальних перерізів стопи і горизонтальних перерізів гомілки, які лежать в координатній площині *yoz*. Координати, які характеризують форму п'яткової частини УСС, отримували шляхом обміру п'ятки стопи, по формо-розмірам близьким до УСС. Цифрова модель поздовжньо-осьового перерізу УСС і гомілки приведені в табл. 3. Обводи поздовжньо-осьового перерізу і контури, апроксимовані радіусо-графічним методом, показані на рис. 5. Отримані цифрові моделі і контури перерізів стопи і гомілки являються графо-аналітичною основою для побудови перерізів колодки для дитячого взуття.

Таблиця 1

Цифрова модель усередненої плантограми дитячих стоп

№ точки	R_i, мм	№ точки	R_i, мм	№ точки	R_i, мм	№ точки	R_i, мм	№ точки	R_i, мм
1	29	8	32	15	-23	22	50	29	48
2	28	9	31	16	-23	23	58	30	44
3	30	10	30	17	-25	24	58	31	45
4	32	11	28	18	27	25	57	32	38
5	32	12	27	19	29	26	54	33	35
6	33	13	-27	20	31	27	54	34	32
7	32,5	14	-24	21	37	28	51		
1′	23	8′	26	15′	0	22′	40	29′	16
2′	22	9′	25	16′	4	23′	55	30′	42
3′	25	10′	23	17′	-15	24′	54	31′	40
4′	26	11′	22	18′	21	25′	54	32′	33
5′	26	12′	21	19′	25	26′	51	33′	29
6′	27	13′	-21	20′	27	27′	51	34′	25
7′	27	14′	-14	21′	31	28′	48		

Таблиця 2

Цифрова модель поперечних перерізів стопи, які відповідають УССд

№ точки	Значення R_i, мм, в поперечних перерізах								
	0,18 $Д_{ст}$	**0,3 $Д_{ст}$**	**0,41 $Д_{ст}$**	**0,50 $Д_{ст}$**	**0,62 $Д_{ст}$**	**0,68 $Д_{ст}$**	**0,73 $Д_{ст}$**	**0,8 $Д_{ст}$**	**0,9 $Д_{ст}$**
1	21	13	-	-	15	20	20	20	20
2	23	17	-	-	20	23	25	25	24
3	27	21	-	-	24	26	29	26	26
4	30	27	23	15	28	30	31	28	28
5	34	31,5	31	26	32	33	33	29	28
6	38	37	38	36	37	34	34	29	27,5
7	47	46	47	43	41	37	35,5	29	25,5
8	69	64	57	51	46	40	36	28	23,5
9	-	-	76	62	50	43	37	28	19
10	-	-	107	67	53	45	36	28	19
11	-	-	85	64	52,5	43	35,5	27	20
12	69	78,5	58	56	49	41	36	28	21
13	52	59	49	47	45	40	35	28	22
14	37	50	43	43	44	39	35	29	23,5
15	33	40	41	41	43	39	36	34	24
16	32	36	37	40	44	40	38	37	29
17	30	33	35	40	45	45	44	42	34
18	28	30	32	38	45	46	46	46	37
19	23	25	29	33	40	40	42	42	36

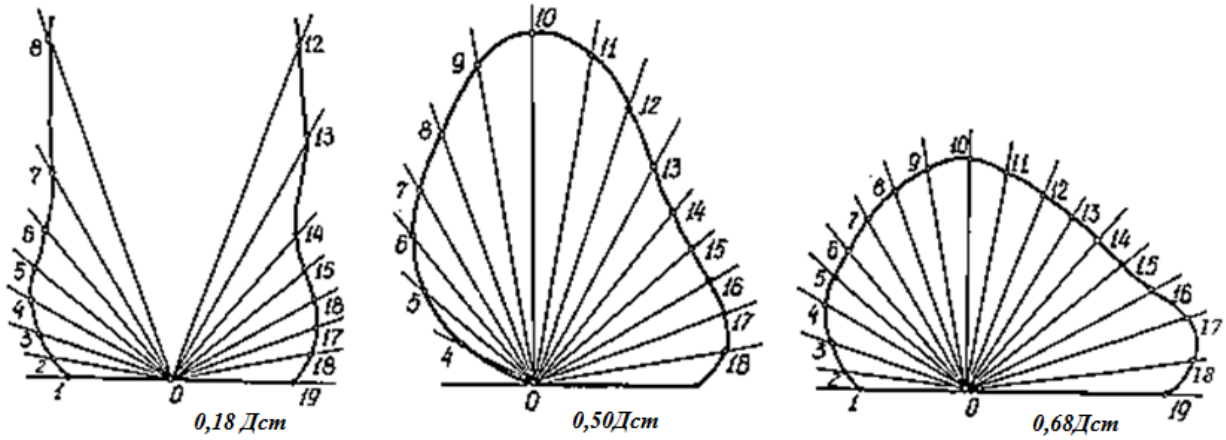


Рис. 2. Обводи поперечних перерізів УССд

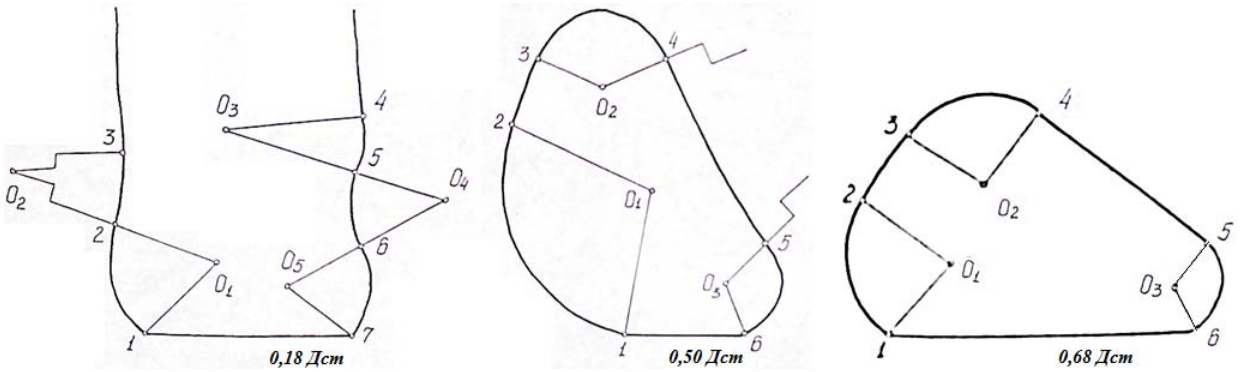
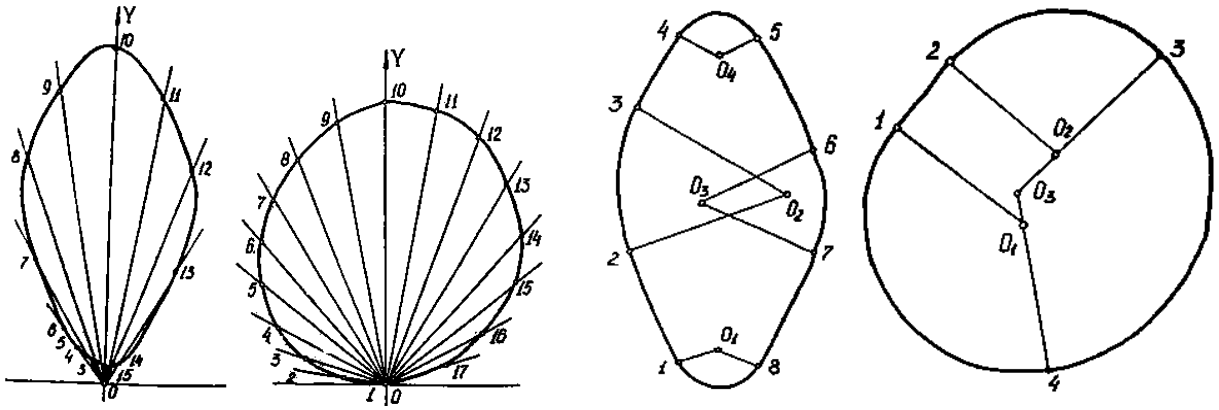


Рис. 3. Радіусо-графічна апроксимація поперечних перерізів УССд

Таблиця 3

Цифрові моделі поперечних горизонтальних перерізів гомілки і поздовжньо-осьових перерізів стопи і гомілки, які відповідають УСС

№ точки	Значення R_i, мм, в перерізах гомілки		Координати Y_i та Z_i, мм в поздовжньо-осьовому перерізі	
	на рівні 70 мм	на рівні 160 мм	*Y*	*Z*
1	5	0	6	0
2	6	10	1,5	10
3	6,5	24	0	20
4	7	33	1	30
5	8	43	2	40
6	20	50	3,5	50
7	41	57	5	70
8	63	63	0	160
9	79	68	72	160
10	87	72	73	107
11	73	71	87	70
12	58	68	90	67
13	31	62	111	53
14	6	52	122	45
15	5,5	42	131	36
16	5	28	145	28
17	-	14	162	22



а б

Рис. 4. Обводи горизонтальних перерізів гомілки (*а*) і їх радіусо-графічна апроксимація (*б*)

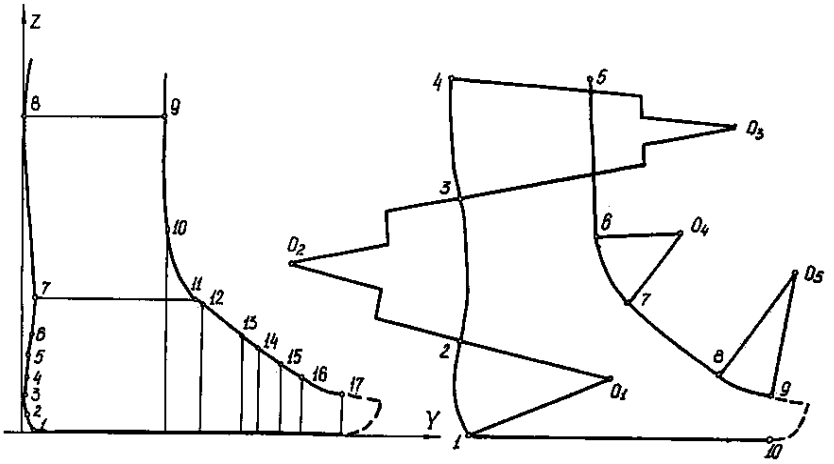


Рис. 5. Обводи поздовжньо-осьового перерізу УССд і їх радіусо-графічна апроксимація

Висновки

На основі отриманих експериментальних даних можна сформувати уточнену базу даних для плоско-вальгусних стоп дітей віком 4,5–10 років. Проведені дослідження дали змогу перетворити одержані формо-розміри УССд в формо-розміри колодки для дитячого ортопедичного взуття, які в подальшому будуть використовуватись для проектування спеціальних колодок і в результаті взуття для визначеної патології.

Література

1. Домбровський А.Б. Дослідження плоско-вальгусних стоп дітей віком 4,5–10 років з метою проектування спеціальних колодок / А. Б. Домбровський, І. Т. Солтик // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 6. – С. 101–107.
2. Ревенко Т.А. Детская стопа и обувь / Т.А. Ревенко, А.Т. Глоба // Стопа и вопросы построения рациональной обуви. – М. : Труды / ЦИТО, 1980.
3. Ченцова К.И. Стопа и рациональная обувь / Ченцова К.И. – М. : Легкая индустрия, 1974.
4. Кочеткова Т.С. Антропологические и биомеханические основы конструирования изделий из кожи : учебник для вузов / Т.С. Кочеткова, В.М. Ключникова. – М. : Легпромбытиздат, 1991.
5. Лыба В.П. Расчет и проектирование сечений колодки для полимерной обуви / В.П. Лыба, В.А. Фукин, А.Б. Домбровский // Каучук и резина. – 1987. – № 10. – С. 29–31.

Рецензія/Peer review : 15.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 867.11.16.004.12

В.О. ПРИВАЛА, О.С. ЗАСОРНОВ
Хмельницький національний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ВОВНЯНОЇ ПРЯЖІ В УМОВАХ ТЕКСТИЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ

В статті розглянуто питання щодо вдосконалення процесу очищення вовняної пряжі в умовах виробництва вітчизняної текстильної промисловості. Один зі шляхів розв'язання цієї задачі автори публікації вбачають у поєднанні відцентрових сил робочої камери і НВЧ поля, що дозволить оптимізувати діючу технологію обробки вовни за рахунок поєднання процесу її прання та сушіння.

Ключові слова: вовняна пряжа, сушіння, віджимання, відцентрові сили, центрифуга, НВЧ поле, оптимізація процесу, миючі розчини, технологічні цикли.

V.O. PRIVALA, O.S.ZASORNOV
Khmelnytsky National University

THE THEORETICAL JUSTIFICATION MICROWAVE TECHNOLOGY DEVELOPMENT CLEANING UNDER WOOL YARN TEXTILE ENTERPRISES

Abstract -The most important branch of light industry - textiles, including cotton, wool and linen company, producing fabrics, threads, yarns and others. It uses natural, artificial and synthetic fibres. Wool industry focuses both on its own and on foreign materials. The main raw material - natural wool. Wool industry - one of the oldest industries textile industry and produces 7,0% of Ukraine tissues, primary processing wool, producing yarn, fabric and wood products. But modern technology in domestic cleaning wool textile enterprises remains multistage and energy, which influences the quality and cost of production. It is therefore proposed to consider one of the ways to improve cleaning wool, which is to optimize the existing wool processing technology through a combination of process of washing and drying in the electromagnetic field of ultrahigh frequency.

Keywords: woollen yarn, drying, spinning, centrifugal force, centrifuge, microwave field, process optimization, cleaning solutions, process cycles.

Вступ

Найважливіша галузь легкої промисловості – текстильна, включає бавовняні, вовняні і лляні підприємства, що виготовляють тканини, нитки, пряжу та ін. Вовняна промисловість України (одна з найстаріших підгалузей текстильної промисловості і виробляє 7,0 % усіх тканин), здійснює первинну обробку вовни, виготовляє пряжу, тканини та вироби з неї. Основний вид сировини – натуральна овеча вовна як власного, так й імпортного виробництва. На цю промисловість працюють великі підприємства в Чернігові, Донецьку, Кривому Розі, Одесі, Сумах. Проте сучасна технологія очищення вовни на вітчизняних текстильних підприємствах лишається багатостадійною та енерговитратою, що впливає на якість і кінцеву собівартість продукції [1].

Тому метою досліджень є створення енергозберігаючої технології очищення вовни за рахунок використання електромагнітного поля надвисокої частоти (НВЧ) для удосконалення процесу обробки вовни-сировини на вітчизняних текстильних підприємствах.

Застосування високочастотної (ВЧ) енергії для сушіння різних предметів і речовин не є новим. Цей принцип вже декілька десятиліть знаходить застосування для сушки дерева, продуктів харчування, паперу та ін. У порівнянні зі звичайним способом сушіння (наприклад, при конвекційному сушінні, коли тепло подається на матеріал у вигляді гарячого повітря), при високочастотній сушці тепло виникає всередині матеріалу, який сушать. Це означає, що в ВЧ-полі процес сушіння текстильного волокна починається не з його поверхні, а з середини, і поступово розвивається у напрямку до зовнішньої поверхні. Нагрівання в ВЧ сушарці, в порівнянні з іншими способами, відбувається швидко (до 5 хвилин). Разом з цим потрібно вказати, що її недоліком є те, що температура в зоні робочої камери місцями є нерівномірною і може

перевищувати 100 ^{0}C. Це пов'язано з тим, що всередині поковок вовни, в результаті утворення парових прошарків, може створюватися більш високий внутрішній тиск, ніж атмосферний. Тому температура може досягати 120–130 ^{0}C, що призводить до небажаного перегріву вовни.

Використання електричного поля надвисоких частот в поєднанні з відцентровими силами є новим і мало вивченим напрямом наукових досліджень. Тому, в даній публікації, пропонується до розгляду саме така технологія сушіння вовни і можливість її використання в умовах вітчизняних текстильних підприємств. Пік патентних винаходів у галузі НВЧ сушіння припав на кінець 70-х років минулого століття, коли в ряді високо економічно розвинених країн, таких як США, Великобританія, Японія, Німеччина, був запатентований ряд технологій НВЧ сушки продуктів харчування, вулканізації гумових камер, сушки паперу, склеювання деревних плит і так далі. Однак висока вартість НВЧ генераторів робила зазначені технології економічно невигідними. І тільки на початку 90-х років минулого сторіччя, завдяки здешевленню технології виробництва НВЧ обладнання, використання поля понад високих частот (1450 МГц) отримало новий імпульс розвитку. Така тенденція зберігається і досі. В наукових роботах Е. Окрес, Г. Пюшнера (США), Ф.Л. Альтер-Песецекого, В.Є. Бровченкова, А.С. Корьєва (Росія), Л.І. Водотовки, М.П. Березненка, В.М. Скрипника, В.В. Яковлєва (Україна) та інших узагальнено світовий і вітчизняний досвід розробки та використання технологій, в основу яких покладено використання НВЧ частоти.

Постановка задачі

Для проведення досліджень використана діюча на вітчизняних текстильних підприємствах технологічна послідовність обробки вовни-сирцю. Вона складається з ряду основних і допоміжних виробничих етапів, які перераховані нижче.

1. Кількісне і якісне приймання вовни.
2. Сортування вовни за видами.
3. Сортування вовни в немитому вигляді по сортам.
4. Подача вовни мийним апаратам (на навантажувачі).
5. Додавання до вовни живильника-розпушувача (тріпальна машина).
6. Мийка в п'яти ваннах: перша ванна (розчин соди для замочування вовни); друга і третя ванни (розчин мила і соди); четверта ванна (мильний розчин); п'ята ванна (полоскання).
7. Віджимання вовни.
8. Сушка вовни в сушильній машині.
9. Транспортування по вентиляційних трубах на упаковку (вичісування і вилежування вовни 24 години).
10. Сортування готової продукції.
11. Визначення якісних показників по залишковій вологості:
- тонка вовна = 12...19%
- груба вовна = 10 ... 19%
- жирна вовна = 0,5 ... 1,15%
- луги = 0,27%
- рослинні і мінеральні домішки = до 4%.

12. Контроль якості.
13. Транспортування готової продукції на склад.

Детальний аналіз вище викладеного технологічного процесу дозволив зробити однозначний висновок, що найбільш трудомісткими і енергоємним є етапи № 6, № 7 і № 8. У зв'язку з цим є доцільним оптимізувати діючу технологію обробки вовни за рахунок поєднання процесу її прання та сушіння (етапи № 6, № 7, № 8) в одному процесі (етапі).

Для вирішення цього завдання пропонується використовувати відцентрові сили (які виникають в центрифузі) і НВЧ-випромінення в сукупності. Ідея полягає в тому, щоб замочування, віджимання та сушка вовни здійснювати на універсальній багаторежимній установці з центрифугою, яка знаходиться в полі НВЧ.

Викладення основного матеріалу

До основних особливостей і переваг НВЧ нагріву слід віднести наступне [2]:
- здатність проникати на значну глибину в об'єкти, що обробляються;
- відсутність контакту з теплоносієм;
- безінерційність процесу нагрівання;
- високий ККД перетворення НВЧ поля в тепло, яке виділяється в об'єкті нагрівання.

Тобто, головна перевага обробки вовни в електромагнітному полі надвисокої частоти полягає у високій швидкості нагріву і скорочення енерговитрат.

Останнім часом інтенсивно проводяться наукові дослідження з використання електрофізичних методів з метою скорочення тривалості процесу теплової обробки. Нагрівання в НВЧ полі дозволяє значно скоротити тривалість теплової обробки, підвищити якість продукції, що випускається, зменшити площу виробничих цехів підприємств і поліпшити санітарно-гігієнічні умови праці.

Технологічні процеси в машинах барабанного типу засновані на принципі динамічного взаємодії матеріальних систем, що поєднують рух барабана і виробів, які піддають обробленню. При цьому на

матеріальну рухому із прискоренням систему діють: відцентрова сила і сила тяжіння, а також сила інерції при зміні швидкості відносного руху обертання барабану. У кожній точці об'єктів, що обробляються, масою ***m,*** дія зазначених сил є талою. У сукупності всі ці сили визначають напрям і характер руху даної матеріальної точки.

Рух відцентрової сили і сили тяжіння характеризується відомим співвідношенням критерію Фруда або фактором поділу [3]:

$$\Phi = \frac{F_ц}{F_T} = \frac{m\omega^2 r}{mg} = \frac{\omega^2 r}{g}, \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість обертання барабану;

r – радіальна відстань від осі обертання до матеріальної точки.

Матеріальна точка з масою ***m*** набуває відносний рух в барабані в бік результуючого прискорення. Результуюча сила $\vec{F} = \vec{F}_ц + \vec{F}_т$ у відносному русі точки визначає силову взаємодію з барабаном у визначенні сили опору $\boldsymbol{P_c}$ і характеризує ефект поділу взаємодіючих систем (виріб-барабан) при даному факторі поділу Φ. Рівняння руху оброблюваної точки в цьому випадку можна представити як:

$$P_{дв} = F \geq\leq P_т, \quad (2)$$

де $P_{дв}$ – сила, яка спрямована в бік руху точки.

Рух матеріального потоку (миючий розчин і виробів, що обробляються) залежить від частоти обертання барабана. Умовно виділяють чотири режими: лавиноподібний при $\Phi << 1$, лавино-водоспадний при $\Phi < 1$, водоспадний (критичний) при $\Phi = 1$ і закритичний при $\Phi >> 1$. Застосовуючи основний фактор, а також і фактори, що впливають на режим руху потоку, можна одержати необхідні змішані або близькі до граничних режими обробки об'єкта, найкращі для протікання процесу. Так, зі зростанням частоти обертання барабана, лавиноподібний режим руху через змішаний (лавино-водоспадний) переходять у водоспадний. При досягненні так званих критичних значень частоти обертання, частина вовни починає обертатися разом з барабаном, не торкаючись його стінок. При подальшому ж збільшення частоти обертання вовна притиснеться до стінок барабану, а сила тертя, яка впливає на поверхню забруднення вовни, а також відцентрова сила обертання барабану, сприяють зрушенню забруднення і видалення його разом з миючим розчином. Умови зсуву забруднення можна представити у наступному вигляді [3]:

$$\frac{P_з}{S_з} \leq \sigma_{зсув} = \frac{P_c}{P_з}, \quad (3)$$

де $P_з$ – сила зчеплення, прикладена до забруднення з боку виробу;

$S_з$ – площа зчеплення забруднення з виробом;

$\sigma_{зсув}$ – механічне напруження зсуву;

P_c – сила, яка протидіє руху виробу в рідині.

НВЧ поле дозволяє нагріти робоче середовище (миючий розчин) і вовну до потрібної температури, а відцентрова сила обертання барабану сприяє видаленню забруднення. Видалення рідини з мокрої вовни виконується після проведення прання вовни в миючому розчині. Віджимання, що передує сушці, є більш економним за сушку, так як на одне віджимання витрачається значно менше енергії і часу. У процесі віджимання з вовни видаляється лише капілярна рідина, яка найменш міцно пов'язана з нею.

Для маси матеріалу, що містить рідину, можна записати наступне рівняння:

$$m_{вм} = m_{см} + m_{рід}, \quad (4)$$

де $m_{вм}$ – маса вологого матеріалу;

$m_{см}$ – маса абсолютно сухого матеріалу;

$m_{рід}$ – маса рідини.

Визначають відносну і абсолютну вологість матеріалу за таким рівняннями:

$$\varphi = \frac{m_{рід}}{m_{вм}} \cdot 100, \quad (5)$$

$$\varphi_a = \frac{m_{рід}}{m_{см}} \cdot 100, \quad (6)$$

Звідси:

$$\varphi_a = \frac{\varphi}{100 - \phi} \cdot 100, \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\varphi}{100 + \phi_a} \cdot 100, \quad (8)$$

Під вологовмістом розуміють масу рідини, яка знаходиться в 1 кг сухого матеріалу. Процес віджимання центрифуги може бути умовно розділений на два етапи. На першому етапі, по мірі наростання швидкості обертання ротора, волокна вовни набувають ущільненого стану, унаслідок чого під впливом

стискаючого навантаження від них відділяється рідина, яка знаходиться в проміжках між волокнами. Процес відділення рідини в цей період здійснюється подібно до процесу фільтрування через пористу перегородку. Під час другого періоду віджимання, в пори волокон вовни проникає повітря. На другому етапі відділення рідини відбувається осадженням під дією гідростатичного тиску відцентрового віджимання. При цьому рідина в проміжках між капілярами вовни перетікає з шарів вовни до стінок ротора центрифуги. В результаті вовна по краях має більш високу вологість (65–75%), ніж по осі обертання центрифуги (30–35%). Середня кінцева вологість виробу складає 45–50 % і визначається за формулою:

$$\varphi = \frac{m_{вол.вир.} \cdot m_o}{m_{вол.вир.}} \cdot 100, \quad (9)$$

де $m_{вол.вир.}$ – маса вологого виробу;

m_o – маса виробу після віджимання.

Кінцева вологість матеріалу залежить від виду матеріалу та товщини його шару, тривалості віджимання, початкової температури та виду обробки. Основний параметр, що впливає на кінцеву вологість вовни, є чинник поділу, який визначається за формулою [3]:

$$\varphi = \frac{\omega^2 \mathrm{R}_{\text{сер}}}{g}, \quad (10)$$

де ω – кутова швидкість обертання ротора;

$R_{сер.}$ – середній радіус центру тяжіння маси виробу;

$$R_{сер} = \frac{\left(P_n + P_p\right)}{2}, \quad (11)$$

де R_n – початковий радіус маси виробу в роторі;

R_p – внутрішній радіус ротора.

Продуктивність центрифуги визначають за формулою:

$$\pi = \frac{m_c}{T_ц}, \quad (12)$$

де $T_ц$ – цикл роботи центрифуги;

$$T_ц = \tau_3 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_T + \tau_P, \quad (13)$$

де τ_3, τ_P – час на завантаження та розвантаження;

τ_1, τ_2 – тривалість відповідно першого та другого періодів віджимання;

τ_T – тривалість гальмування ротора.

Цикл роботи центрифуги триває 8–30 хвилин в залежності від масиви вовни, що завантажується. Перевагою зневоднення в центрифузі є те, що вовну не піддають посиленому механічному впливу, що не спричиняє зниження її міцності. Математична модель сушіння вовни в НВЧ полі при центрифугуванні детально викладена в [4].

Висновки

Вищевикладене теоретичне обґрунтування чищення шляхом поєднання відцентрових сил і НВЧ поля дозволить оптимізувати діючу технологію обробки вовни, за рахунок поєднання процесу її прання та сушіння. Здійснене теоретичне обґрунтування мікрохвильової технології очищення вовняної пряжі дозволяє розробити макет обладнання для здійснення прання та сушіння вовни в електромагнітному полі надвисокої частоти.

Література

1. Вовняна промисловість України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://ukrkniga.org.ua/ukrkniga-text/842/17

2. Альтер-Песоцкий Ф.Л. Применение СВЧ энергии в текстильной промышленности / Ф.Л. Альтер-Песоцкий, Л.И. Островский. – К. : Текстильная промышленность. – 1975. – № 9. – С. 78–89.

3. Лебедев В.С. Технологические процессы машин и аппаратов в производствах бытового обслуживания / Лебедев В.С. – М. : Легпром, 1991. – С. 36–45.

4. Розробка мікрохвильової технології очищення вовняної пряжі та створення обладнання : звіт про НДР : 2Б-1997 / Хмельницький нац. ун-т ; кер. В.М. Скрипник ; викон.: В.О. Привала [та ін.]. – Хмельницький, 1998. – 65. – № ДР 097V016013.

Рецензія/Peer review : 10.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Кущевський М.О.

УДК 677.027.4

О.М. ГУЩАК
Львівський інститут економіки і туризму
Б.Д. СЕМАК
Львівська комерційна академія

ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННИХ БАРВНИКІВ ДЛЯ СВІТЛОСТАБІЛІЗАЦІЇ ШОВКОВИХ І КАПРОНОВИХ ПЛАТТЯНИХ ТКАНИН

В роботі вивчена можливість і обґрунтована доцільність використання деяких видів рослинних барвників текстильного призначення для підвищення світлостійкості пофарбувань і субстрату шовкових і капронових платтяних тканин літнього асортименту з метою більш раціонального використання потенційних ресурсів наявної в країні текстильної сировини, а також підвищення світлостійкості та екологічної безпечності названих видів тканин. Особлива увага приділена пошуку тих нових видів рослинних барвників, які одночасно гарантують більш повне і раціональне використання потенційних ресурсів шовкових і капронових платтяних тканин за їх світлостійкістю та надання цим тканинам бажаної гігієнічності та екологічної безпечності.

Ключові слова: шовкові та капронові тканини, світлостійкість пофарбувань і субстрату, рослинні барвники, потенційний ресурс, світлостабілізація.

O.M. HUSCHAK
Lviv Institute of Economics and Tourism
B.D SEMAK
Lviv Academy of Commerce

THE USE OF VEGETABLE DYES IS FOR LIGHT STABILITY OF SILK AND KAPRON DRESS FABRICS

Abstract – In process the studied possibility and appropriateness of using certain types of plant dyes from the textile industry to improve the lightfastness of the substrate and paperboar silk and nylon fabrics a summer range for the purpose of more rational use of potential resources available in the country of textile raw materials, and improve the light stability and environmental safety of these types of fabrics. Special attention is paid to the search for new kinds of vegetable dyes, which simultaneously ensures a more complete and rational use of potential resources, silk and nylon fabrics with a light fastness them and making them of the desired tissues hygiene and environmental safety.

Keywords: silk and nylon fabric, light and substrate fastness, vegetable dyes, potential resource, lightstabilization.

Вступ

Як свідчить аналіз літературних джерел [1, 2, 3] і результатів наших досліджень [4, 5], в практиці текстильного виробництва багатьох економічно розвинутих країн (особливо Азії та Європи) в останні роки відбувається відродження забутих традицій фарбування одягових і декоративних текстильних матеріалів різноманітними видами рослинних барвників. Це обумовлено тим, що використання в текстильному виробництві рослинних барвників замість токсичних марок синтетичних барвників дозволяє вирішувати декілька важливих завдань, а саме:

- використати наявні в країні ресурси текстильної екологобезпечної сировини, яка на відміну від зарубіжних країн практично не використовується;
- екологізувати технологію виробництва та використання барвників текстильного призначення та суттєво покращити умови праці робітників в цих галузях;
- суттєво підвищити екологічну безпечність одягових текстильних матеріалів при їх фарбуванні в результаті часткової заміни рослинними барвниками токсичних марок синтетичних барвників;
- розширити та збагатити колірну гаму пофарбувань текстильних одягових і декоративних матеріалів шляхом їх фарбування світлостійкими та екологобезпечними видами вітчизняних рослинних барвників.

Постановка проблеми

Як свідчать результати проведених нами досліджень [4, 5, 6], світлостійкість на одягових тканинах пофарбувань, отриманих різними видами досліджуваних рослинних барвників, знаходиться в широкому інтервалі і залежить не тільки від виду рослинного барвника, але й від виду обраного протравлювача та виду субстрату. Тому для забезпечення рівномірного і раціонального використання потенційних ресурсів за світлостійкістю рослинного барвника, протравлювача й субстрату і виключення їх взаємного негативного впливу при експлуатації одягу з цих тканин виникає нагальна потреба в індивідуальному підборі окремих видів барвників, протравлювачів і субстрату за їх світлостійкістю.

Разом з тим, як показали наші дослідження [5], із семи видів обраних нами рослинних барвників (екстрактів квіток кінського каштану, трави багна звичайного, трави деревію, трави материнки, трави родовика лікарського, листків дикого винограду і відходів тютюну) для фарбування камвольної чисто вовняної платтяної тканини арт. 1144 тільки два із них (екстракт трави деревію, екстракт трави родовика лікарського) забезпечують практично рівномірне світлостаріння як барвника, так і субстрату. Наприклад, якщо після 300 год сонячного опромінення загальний колірний контраст від знебарвлення пофарбованої екстрактом деревію вовняної тканини склав 5,3 од. ΔЕ (нижня межа знебарвлення становить 8,0 од. ΔЕ або 2 бали темної шкали сірих еталонів), то зниження розрахункового розривного навантаження за основою цієї

тканини за вказаний період опромінення досягло відповідно 41,7%. Аналогічна закономірність характерна і для світлостаріння цієї тканини, пофарбованої екстрактом родовика лікарського.

Таким чином, можна передбачити, що обрані нами рослинні барвники більш доцільно використовувати для фарбування текстильних матеріалів із менш щільною структурою і більш низькими показниками їх механічних властивостей. Цим вимогам в певній мірі відповідають обрані нами для дослідження шовкова платтяна тканина арт. 11023 і капронова платтяно-блузкова тканина арт. 52013

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Потреба більш широкого висвітлення в періодичних виданнях інформації про асортимент, властивості, сфери застосування, переваги та недоліки рослинних барвників текстильного призначення обумовлена низкою причин, а саме:

- потребою обґрунтувати доцільність більш повного і ефективного використання в практиці вітчизняного текстильного виробництва ще практично не використаних ресурсів вітчизняної екологічно безпечної сировини, яка на зарубіжних ринках користується в останні роки великою популярністю;
- потребою обґрунтування сфер найбільш раціонального використання рослинних барвників замість токсичних марок синтетичних барвників при виробництві екологобезпечного і елітного текстилю (особливо дитячого, медико-профілактичного призначення);
- потребою розширення та збагачення колірної гами пофарбувань одягу перспективного асортименту (екологобезпечного та елітного призначення).

Для прикладу розглянемо деяку інформацію про результати наших попередніх досліджень асортименту та якості платтяних тканин, пофарбованих деякими видами рослинних барвників.

В роботі [4] вивчено вплив виду рослинного барвника, протравлювача та субстрату на кінетику світлостаріння пофарбувань і субстрату в залежності від тривалості сонячного опромінення досліджуваних вовняних, шовкових і поліамідних платтяних тканин. Запропоновані математичні моделі, які описують кінетику цього процесу. Обґрунтована доцільність використання для світлостабілізації отриманих на основі екстрактів кори черемхи і листків черемхи пофарбувань $CuSO_4$ і непридатність для цієї цілі $KAl(SO_4)_2$, $K_2Cr_2O_7$ і $Fe(NH_4)(SO_4)_2$.

В роботі [5] дана порівняльна характеристика впливу виду рослинного барвника (екстрактів із трави багна, листків дикого винограду, трави гірчака перцевого, сухих ягід глоду, трави деревію, трави материнки, коренів ревеню, кори і листків черемхи), виду протравлювачів ($KAl(SO_4)_2$, $K_2Cr_2O_7$, $CuSO_4$, $FeSO_4$, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$) та виду субстрату (вовняна, шовкова та капронова платтяна тканина) на формування колірної гами пофарбувань. Окрім цього, на прикладі вовняних платтяних тканин вивчено вплив названих рослинних барвників і протравлювачів на зміну світлостійкості пофарбувань і субстрату (після 300 год сонячного опромінення).

В роботі [8] авторами встановлено, що світлостійкість пофарбування досліджуваних тканин залежить не тільки від виду рослинного барвника, але й від виду протравлювача, волокнистого складу самих полотен і тривалості їх сонячного опромінення. При цьому показано, що використання екстрактів кори яблуні лісової забезпечує на лляних тканинах більш високу світлостійкість пофарбувань. Окрім цього, встановлено, що протравлювання тканин $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ і $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ суттєво гальмує фотодеструкцію пофарбувань, отриманих екстрактами коренів марени фарбувальної, і навпаки, значно прискорює фотодеструкцію пофарбувань, отриманих на цій же тканині екстрактами кори яблуні лісової. Встановлено, що досліджувані види рослинних барвників, незважаючи на їх високу світлостійкість, ще не гарантують повного і ефективного використання потенційних ресурсів, закладених в світлостійкість субстрату.

В роботі [9] дана порівняльна характеристика світлостійкості пофарбувань і субстрату пофарбованих екстрактами коренів марени фарбувальної і кори яблуні лісової (дички) бавовняних і бавовняно-котонінових (20 % лляного котоніну) трикотажних полотен, а також бавовняної і лляної платтяних тканин, протравлених ($KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ і $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, на зміну світлостійкості пофарбувань і субстрату названих полотен.

В роботі [10] вивчено вплив рослинного барвника (екстракту шкірки гранату), протравлювача ($KAl(SO_4)_2$) і застосування різних методів фарбування (без протравлювання, з попереднім протравлюванням, одночасним протравлюванням та протравленням опісля фарбування) на формування колірної гами пофарбувань та їх оцінки за допомогою колориметричного методу оцінок та зміни якості субстрату (за показниками розривального навантаження). Обґрунтована доцільність використання для світлостабілізації отриманих з екстракту шкірки гранату пофарбувань з одночасним протравлюванням $KAl(SO_4)_2$.

Мета роботи: вивчення можливості та обґрунтування доцільності пріоритетного використання найбільш перспективних видів рослинних барвників текстильного призначення для світлостабілізації літніх платтяно-блузкових шовкових і капронових тканин.

Викладення основного матеріалу та його авторська трактовка

Необхідність пріоритетного використання рослинних барвників для фарбування літнього асортименту шовкових і капронових платтяно-блузкових тканин замість токсичних марок синтетичних обумовлена низкою причин, а саме:

- низькою світлостійкістю волокнистої основи цих тканин і потребою їх світлостабілізації в процесі їх оздоблення;
- можливістю використання більш широкого асортименту рослинних барвників для фарбування

названих тканин за рівнем їх світлостійкості;

- можливістю більш повного і раціонального їх використання потенційних ресурсів субстрату цих тканин і ресурсу самих рослинних барвників на відміну від вовняних, бавовняних і лляних тканин аналогічного призначення, пофарбованих тими ж рослинними барвниками.

Тому використання рослинних барвників замість токсичних марок синтетичних для фарбування шовкових і капронових тканин літнього асортименту сприяє не тільки збагаченню та розширенню колірної гами отриманих на них пофарбувань, але й певній мірі підвищенню їх гігієнічності (особливо капронових тканин).

З метою реалізації цього різнопланового завдання об'єктом дослідження служили: платтяно-блузкова шовкова (арт. 11023) і капронова (арт. 52013) тканини вітчизняного виробництва. Для фарбування цих тканин були обрані ще не досліджені і щорічно відновлювані в достатніх обсягах рослинні барвники (гірчак перцевий, кермек Гмеліна, ягоди глоду, кора черемхи, листки черемхи, кореня ревеню). Оскільки названі види рослинних барвників відносяться до класу кислотно-протравних, то для їх протравлювання були використані: $KAl(SO_4)_2$, $K_2Cr_2O_7$, $CuSO_4$, $FeSO_4$, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$. Фарбування досліджуваних тканин з одночасним їх протравлюванням було проведено в лабораторних умовах кафедри художнього текстилю Львівської національної академії мистецтв [1].

Оцінку світлостійкості пофарбувань і субстрату досліджуваних тканин проводили за описаною раніше методикою [4]. Отримані результати досліджень наведені в табл. 1, 2, 3. Аналіз цих даних дозволяє зробити наступні узагальнюючі висновки та пропозиції.

Таблиця 1

Вплив виду рослинного барвника, виду протравлювача і тривалості сонячного опромінення на світлостійкість пофарбувань і субстрату шовкової тканини

№ з/п	Назва рослинного барвника і протравлювача	Загальний колірний контраст, од. ΔE / зміна розривного навантаження тканини за основою, %		
		Після опромінення, год		
		100	200	300
1	2	3	4	5
1	Фарбування екстрактом трави **гірчака перцевого** в кислій ванні без протравлювання	3,00/81,8	4,09/72,1	8,32/54,9
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	3,76/90,0	5,77/60,2	8,06/50,6
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	3,15/84,8	6,57/72,6	11,43/55,7
	Теж, $CuSO_4$	1,02/81,7	3,68/71,9	8,26/49,1
	Теж, $FeSO_4$	1,32/83,4	2,56/73,8	5,81/56,3
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	3,15/83,3	4,66/72,7	7,26/55,6
2	Фарбування екстрактом трави **кермеку Гмеліна** в кислій ванні без протравлювання	4,72/83	8,16/72,8	11,62/55,8
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	4,15/89,5	5,03/59,7	5,39/53,5
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	4,18/82,7	6,36/70,6	7,75/49,4
	Теж, $CuSO_4$	3,98/82,5	6,15/69,9	9,09/45,3
	Теж, $FeSO_4$	2,37/83,3	4,68/70,6	6,58/47,4
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	3,83/84,0	6,05/72,0	9,47/47,5
3	Фарбування екстрактом **ягід глоду** в кислій ванні без протравлювання	2,26/81,8	2,54/71,6	5,63/50,2
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	3,85/89,3	5,62/60,7	6,67/47,7
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	8,22/83,5	9,12/72,2	13,08/51,3
	Теж, $CuSO_4$	1,44/82,2	3,13/73,3	5,89/46,2
	Теж, $FeSO_4$	5,02/82,9	5,78/70,5	6,60/52,1
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	3,86/83,9	3,90/69,9	4,06/47,3

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
4	Фарбування екстрактом **кори черемхи** в кислій ванні без протравлювання	4,16/85,5	4,91/71,9	5,61/50,7
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	5,80/89,7	6,01/60,1	6,18/50,5
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	6,48/84,6	8,27/72,4	10,51/56,1
	Теж, $CuSO_4$	1,98/87,4	4,30/74,3	6,61/50,5
	Теж, $FeSO_4$	7,04/86,5	7,56/75,2	7,90/57,2
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	7,35/83,7	9,25/73,1	10,77/54,6
5	Фарбування екстрактом **листків черемхи** в кислій ванні без протравлювання	1,68/86,4	3,26/72,3	3,36/49,5
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	3,28/86,8	5,07/61,2	8,81/51,2
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	5,31/84,9	7,28/71,2	10,48/56,2
	Теж, $CuSO_4$	1,15/85,3	3,80/71,4	4,31/46,9
	Теж, $FeSO_4$	2,98/85,3	4,56/72,4	5,94/56
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	5,49/84,9	7,43/72	8,27/52
6	Фарбування екстрактом **кореня ревеню** в кислій ванні без протравлювання	12,90/85,6	14,73/71,2	14,62/49,5
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	10,49/88,9	15,10/59,5	15,36/49,6
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	2,45/88,6	2,80/74,5	4,44/58,2
	Теж, $CuSO_4$	7,55/ 84,2	10,52/67,4	11,43/53
	Теж, $FeSO_4$	5,55/86,5	7,77/73,1	9,48/55,6
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	4,95/86,3	6,83/84,4	7,75/53,3

Примітка: зниження розривального навантаження відбіленої шовкової тканини за основою після опромінення 100, 200, 300 год становить відповідно: 17,7; 31,8 і 42,9 %

Як видно з аналізу даних табл.1, із 6-ти видів співставлених рослинних барвників, взятих для фарбування шовкової тканини без протравлювання, найбільш високою світлостійкістю характеризується пофарбування, отримане на цій тканині екстрактом із сухих листків черемхи і найнижчу світлостійкість має пофарбування, отримане екстрактом із кореня ревеню. Після 300 год сонячного опромінення вони складають відповідно 3,4 і 14,6 од. ΔЕ. За цих умов розривальне навантаження за основою досліджуваної шовкової тканини знизилось відповідно в обох випадках на 50,5%. Таким чином, якщо екстракт листків черемхи гарантує рівномірне світлостаріння і барвника і субстрату, то екстракт кореня ревеню значно швидше обумовлює світлостаріння її пофарбування і нераціональне використання її потенційного ресурсу за світлостійкістю субстрату.

Подібна закономірність характерна і для шовкової тканини, пофарбованої екстрактом із кермеку Гмеліна. В цьому випадку також світлостійкість пофарбування виявилось значно нижчою, ніж світлостійкість субстрату. Разом з тим, оправданим виявилось фарбування шовкової тканини екстрактами із сухих ягід глоду і кори черемхи, оскільки в обох випадках досягається практично рівномірне світлостаріння і барвників і субстрату.

Суттєвий вплив на зміну світлостійкості пофарбувань, обраними нами рослинними барвниками, як видно із аналізу даних табл.1., можуть мати обрані види протравлювачів. При цьому встановлено, що кожний вид протравлювача індивідуально змінює світлостійкість окремого виду рослинного барвника. В залежності від хімічної будови протравлювача і барвника цей вплив на зміну світлостійкості пофарбування і субстрату шовкової тканини може бути нейтральним, світлосенсибілізуючим чи інгібуючим. Причому найбільш виправданим вважається таке поєднання протравлювача субстрату і рослинного барвника, коли протравлювач інгібує (гальмує) світлостаріння і барвника і субстрату.

Прикладом такого вдалого поєднання рослинного барвника, протравлювача і субстрату при фарбуванні шовкової тканини може бути одночасне з її фарбуванням екстрактом кореня ревеню протравлювання $K_2Cr_2O_7$. В результаті цього протравлення загальний колірний контраст на цій тканині після 300 год її сонячного опромінення знижується із 14,6 од. ΔЕ до 4,4 од. ΔЕ, а втрата розривального навантаження за основою субстрату відповідно із 50,5 до 41,8%. І, навпаки, $K_2Cr_2O_7$ виявися непридатним для протравлювання і фарбування шовкової тканини екстрактом ягід глоду, оскільки він також в 2,5 рази прискорює світлостаріння пофарбування.

Для обґрунтування можливості використання окремих видів рослинних барвників і протравлювачів для фарбування капронових платтяно-блузкових тканин з пониженою світлостійкість субстрату представлялось доцільним:

- співставити кінетику світлостаріння пофарбування і субстрату названих тканин в залежності від тривалості їх сонячного опромінення (табл. 1, табл. 2)
- співставити абсолютні значення розривного навантаження за основою шовкових і капронових тканин (до і після їх 300 год сонячного опромінення) із існуючою граничною нижчою межею світлостаріння (табл. 3), яка оцінюється відповідно колірним контрастом 8 од. ΔЕ і розривальним навантаженням смужки 25х50 мм 60 Н, свідчить:
- фарбування капронової тканини окремими видами рослинних барвників на відміну від шовкової забезпечує більш раціональне використання потенційного ресурсу і рослинного барвника і субстрату, оскільки капронова тканина характеризується менш світлостійким субстратом;
- для фарбування платтяно-блузкових шовкових і капронових тканин можуть використовувати одні і ті ж рослинні барвники;
- як і для шовкових тканин, світлостабілізація пофарбування і субстрату капронових тканинах може проводитися відповідним індивідуальним підбором окремих видів протравлювачів (табл. 1–3).

Таблиця 2

Вплив виду рослинного барвника, виду протравлювача і тривалості сонячного опромінення на світлостійкість пофарбувань і субстрату капронової тканини

№ з/п	Назва рослинного барвника і протравлювача	Загальний колірний контраст, од. ΔЕ / Зміна розривного навантаження тканини за основою, %		
		опромінення		
		100	200	300
1	2	3	4	5
1	Фарбування екстрактом трави **гірчака перцевого** в кислій ванні без протравлювання	2,15/76,8	3,35/62,5	7,72/41,1
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	0,13/79,9	2,66/65,4	5,46/37,9
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	3,03/88,3	6,05/77,3	11,04/43,7
	Теж, $CuSO_4$	3,74/75,9	4,86/60,4	9,76/38,3
	Теж, $FeSO_4$	2,04/77,5	3,25/58,9	6,95/35,4
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	2,42/75,1	3,55/60,9	7,95/37,3
2	Фарбування екстрактом трави **кермеку Гмеліна** в кислій ванні без протравлювання	3,46/83,1	5,30/72,7	7,22/42,4
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	4,61/78,0	5,17/62,4	5,98/44,5
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	3,48/77,8	5,03/60,8	5,88/46,2
	Теж, $CuSO_4$	3,22/71	5,24/55,7	6,18/36,4
	Теж, $FeSO_4$	2,29/71,5	3,92/50,3	5,8538,5
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	5,31/75,2	6,70/52,8	9,06/33,9
3	Фарбування екстрактом **ягід глоду** в кислій ванні без протравлювання	6,21/81,8	6,83/48,7	7,81/33,8
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	4,44/82,0	6,71/55,8	9,09/34,5
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	6,11/81,8	7,82/48,7	9,55/33,8
	Теж, $CuSO_4$	4,83/85,2	7,22/57,4	10,5934,6
	Теж, $FeSO_4$	5,05/80,3	7,81/52,9	9,68/33,7
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	2,40/86,9	3,56/63,1	11,8439,3
4	Фарбування екстрактом **кори черемхи** в кислій ванні без протравлювання	4,96/80,1	7,87/54,3	10,52/40,4
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	6,16/85,5	7,66/61,0	8,90/42,8
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	4,05/84,6	6,48/66,1	9,25/47,5
	Теж, $CuSO_4$	9,41/84,3	12,31/54,9	14,95/36,7
	Теж, $FeSO_4$	8,21/84,8	9,78/58,9	10,96/43,7
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	10,36/82,5	13,94/57,8	15,8038,3

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
5	Фарбування екстрактом **листків черемхи** в кислій ванні без протравлювання	2,05/70,4	3,47/45,4	5,55/38,8
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	5,64/76,1	7,85/46,1	10,32/40,5
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	2,41/75,9	5,10/51,1	7,12/40,1
	Теж, $CuSO_4$	1,54/76,1	3,11/41,9	4,22/36,1
	Теж, $FeSO_4$	2,22/73,4	3,69/41,1	4,03/34,2
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	0,93/79,9	4,29/52,1	7,12/39,1
6	Фарбування екстрактом **кореня ревеню** в кислій ванні без протравлювання	15,10/75,8	16,01/55,0	17,28/40,9
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	15,90/74,6	18,29/59,9	19,99/47,5
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	8,48/76,2	9,82/62,5	11,24/37,5
	Теж, $CuSO_4$	17,34/79,7	18,81/62,1	19,34/48,4
	Теж, $FeSO_4$	12,13/88,8	13,29/70,0	13,43/46,9
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	13,06/67,5	13,90/55,8	14,81/32,5

Примітка: зниження розривального навантаження відбіленої капронової тканини за основою після опромінення 100, 200, 300 год становить відповідно: 20,4; 34,9 і 57,3 %

Таблиця 3

Вплив рослинного барвника, протравлювача і тривалості сонячного опромінення на зміну абсолютних значень розривного навантаження за основою шовкових і капронових тканин

№ з/п	Назва рослинного барвника і протравлювача	Розривне навантаження тканини за основою, Н			
		Шовк		Капрон	
		До опромінення	Після 300 год опромінення	До опромінення	Після 300 год опромінення
1	2	3	4	5	6
1	Фарбування екстрактом трави **гірчака перцевого** в кислій ванні без протравлювання	226	124	168	69
	Фарбування гірчаком перцевим в кислій ванні з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	261	132	179	68
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	230	128	163	63
	Теж, $CuSO_4$	224	110	154	59
	Теж, $FeSO_4$	229	129	173	61
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	227	126	169	63
2	Фарбування екстрактом **кермеку Гмеліна** в кислій ванні без протравлювання	224	125	172	73
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	258	138	173	77
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	231	114	171	79
	Теж, $CuSO_4$	223	101	176	64
	Теж, $FeSO_4$	228	108	179	69
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	225	107	165	56
3	Фарбування екстрактом **ягід глоду** в кислій ванні без протравлювання	225	113	153	51
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	262	125	165	57
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	230	104	154	52
	Теж, $CuSO_4$	225	122	162	56
	Теж, $FeSO_4$	234	115	157	53
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	243	118	168	66

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6
4	Фарбування екстрактом **кори черемхи** в кислій ванні без протравлювання	221	112	151	61
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	263	133	159	68
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	228	128	162	77
	Теж, $CuSO_4$	214	108	153	56
	Теж, $FeSO_4$	222	127	158	69
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	227	124	154	59
5	Фарбування екстрактом **листків черемхи** в кислій ванні без протравлювання	220	109	152	59
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	258	132	163	66
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	226	127	162	65
	Теж, $CuSO_4$	224	105	155	56
	Теж, $FeSO_4$	226	126	158	54
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	225	117	169	66
6	Фарбування екстрактом **кореня ревеню** в кислій ванні без протравлювання	222	110	149	61
	Теж, з одночасним протравлюванням: $KAl(SO_4)_2$	262	130	162	77
	Теж, $K_2Cr_2O_7$	220	128	168	63
	Теж, $CuSO_4$	223	124	153	74
	Теж, $FeSO_4$	216	114	160	75
	Теж, $Fe(NH_4)(SO_4)_2$	257	137	160	52
7	Відбілена тканина	198	113	152	65

При завершенні даної роботи слід зауважити, що на інтенсивність і кінетику її світлостаріння субстрату досліджуваних тканин, як видно з аналізу даних табл. 1–3 певний вплив можуть мати неоднозначні структурні зміни субстратах цих тканин в процесі її фарбування і протравлювання (ущільнення, деформація та інші).

Загальні висновки

1. Шляхом відповідного відбору виду рослинного барвника і виду протравлювача запропоновано алгоритм світлостабілізації пофарбування і субстрату шовкових і капронових платтяно-блузкових тканин літнього асортименту. Він базується на формуванні заданої світлостійкості окремих компонентів цих тканин-субстрату, барвника і протравлювача і врахуванні їх взаємного впливу в процесі фотодеструкції.

2. При світлостабілізації досліджуваних шовкових і капронових тканин найбільш вдалим поєднанням в них субстрату, рослинного барвника та протравлювача з метою забезпечення найбільш ефективного використання їх потенційного ресурсу за світлостійкістю слід вважати:

- фарбування шовкових тканин екстрактами листків черемхи, ягід глоду і гірчака перцевого і відповідно їх протравлюванні $CuSO_4$, $FeSO_4$;
- фарбування капронової тканини екстрактами листків черемхи, ягід глоду, кермеку Гмеліна і гірчака перцевого і відповідно їх протравлювання $CuSO_4$, $FeSO_4$ і $Fe(NH_4)(SO_4)_2$.

Література

1. Семак З.М. Фарбування текстильних матеріалів рослинними барвниками : навчальний посібник / З.М. Семак, Б.Б. Семак. – Львів : Світ, 2005.– 368 с.

2. Семак Б.Б. Наукові засади формування ринку рослинної сировини та його окремих сегментів в Україні : монографія / Б.Б. Семак. – Львів : Видавництво Львівської комерційної академії, 2007. – 512 с.

3. Zarkogiani M. Colour and fastness of naturel dyes: revival of traditional dyeing techniques / Zarkogiani M., Mikropolou E., Varella E., Tratsaroni E. // Colorat. Technol. – 2011. – 127. – № 1. – P. 18–27

4. Гущак О.М. Вплив виду рослинного барвника та протравлювача на світлостійкість костюмних тканин / О.М. Гущак // Вісник Львівської комерційної академії. – 2015. – № 15. – С. 54–59. – (Серія товарознавча)/

5. Гущак О.М. Оцінка ролі рослинних барвників у формуванні асортименту та якості екологобезпечного текстилю / О.М. Гущак, Б.Д. Семак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5. – С. 168–173.

6. Семак Б.Б. Вплив рослинних барвників і протравлювачів на якість забарвлення на вовняних тканинах / Б.Б. Семак, З.М. Семак, О.М. Гущак, М.Н. Коваль // Вестник Херсонского государственного университета. – 2004. – № 2 (20). – С. 191–197.

7. Бузов Б.А. Материаловедение швейного производства / Б.А. Бузов, Т.А. Модестова, Н.Д. Алыменкова. – М. : Легкпромбытиздат, 1986. – 424 с.

8. Пахолюк О. В. Вплив виду протравлювача та способу протравлювання пофарбованих рослинними барвниками бавовняної і лляної сорочкових тканин на їх екологічну безпечність / О. В. Пахолюк, Б. Б. Семак // Товарознавчий вісник. – 2013. – Випуск 6. – С. 98–105.

9. Мартосенко М. Г. Використання рослинних барвників для екологізації та світлостабілізації целюлозомістких текстильних полотен / М. Г. Мартосенко, О. В. Пахолюк, З. М. Семак // Вісник Херсонського національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 212–218.

10. Shams-Nateri A. Colorimetric Study on Polyamides Dyeing With Weld and Pomegranate Peel Natural Dye / A. Shams-Nateri // Clothing and Textiles Research Journal. – 2014. – 32. – № 2. – P. 124–135.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 687.4.02

Г.М. ХИМИЧ, М.О. КУЩЕВСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ВОВНЯНИХ ТКАНИН ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОСТОРОВОЇ ВІБРАЦІЇ

У статті розглянуто проблеми, пов'язані із наданням вовняним тканинам об'ємної форми, а саме їх здатність до формування. Наведено дані експериментальних досліджень формування тканин за допомогою просторової вібрації. Дослідження проведено на трьох артикулах тканин пальтової групи. У результаті аналізу експериментальних досліджень визначено раціональні параметри процесу формування для обраних тканин.

Ключові слова: просторова вібрація, формування, раціональні параметри, об'ємна форма, вовняні тканини.

G.M. KHYMYCH, M.O. KUSHEVSKIY
Khmelnytsky National University

THE INVERSTIGATION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE FORMING PROCESS OF WOOL FABRICS USING SPATIAL VIBRATION

The article examines the problems associated with the provision of wool fabrics three-dimensional shape, namely their ability to form. The data of experimental researches of formation of fabrics using a spatial vibration. The study was conducted on three coats fabric articles of the group. As a result of analysis of experimental studies to identify rational parameters of the process of formation for selected fabrics.

Keywords: spatial vibration, of the formation, environmental settings, three-dimensional shape, woollen fabric.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день перед виробниками швейних виробів стоїть завдання покращення товарного вигляду, підвищення якості і конкурентоспроможності виробів, у тому числі головних уборів. Останні характеризуються об'ємною формою, тому при їх виготовленні основне завдання полягає у наданні плоскому зразку матеріалу об'ємної форми. Тому матеріал повинен добре деформуватись, щоб набути необхідної форми, але одночасно і бути пружним для її стійкого збереження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Головною характеристикою тканини є наявність взаємно перпендикулярних ниток основи та утоку, які утворюють систему ниток. Завдяки цьому за теорією Чебишева тканина здатна огинати криволінійну поверхню за рахунок зміни кута між системою ниток основи і утоку (сітьового кута), не змінюючи при цьому своїх лінійних розмірів. При цьому зі збільшенням можливості зміни сітьового кута підвищується формувальна здатність тканини [1]. Однак не всі тканини здатні однаково покривати поверхню. Це залежить від структурних характеристик матеріалу, його волокнистого складу, характеру кривизни поверхні та способу надання тканині об'ємної форми. Останній може бути як статичним, так і динамічним.

Динамічні методи формування дозволяють отримати деталі вищої якості при значно менших енергетичних, трудових та металоємних затратах [2]. Однак відомі способи динамічного формування текстильних матеріалів [2–6] засновані на використанні вертикальних вібраційних коливань. Прикладення навантаження під іншими кутами до площини тканини, що широко застосовується та має позитивний ефект у інших галузях промисловості, залишилось поза увагою дослідників у швейній галузі.

Формулювання мети статті. Метою даної роботи є дослідження процесу формування вовняних пальтових тканин за допомогою просторової вібрації.

Виклад основного матеріалу. Для досліджень використано розроблену експериментальну установку для формування за допомогою просторової вібрації [7], яку забезпечують поєднанням

вертикальної та горизонтальної вібрації та води у якості робочого середовища. Методика проведення досліджень детально описана у [7]. Формувальним елементом виступає жорстка перфорована півсфера із радіусом 40,5 мм. Критерієм оцінювання якості процесу формування є запропонований коефіцієнт розбіжності K_p, який визначають за формулою 1:

$$K_p = \left(h_{ф.ел} - h_{д.заг}\right) / h_{ф.ел}, \quad (1)$$

де K_p – коефіцієнт розбіжності між деталлю та формувальним елементом;

$h_{ф.\ ел.}$ – висота формувального елемента, мм;

$h_{д.заг.}$ – висота відформованої деталі відразу після формування, мм.

Даний показник показує невідповідність отриманої форми деталі формувальному елементу, тому зі зменшенням його значення підвищується якість формування.

Основними характеристиками вібраційного процесу формування є амплітуда та частота вібрації. Тому вхідними параметрами процесу є амплітуда вертикальної вібрації (x_1), її частота (x_2), амплітуда горизонтальної вібрації (x_3) та її частота (x_4). На основі проведених попередніх досліджень [8] встановлено діапазон значень цих факторів: амплітуда вібрації – 1÷5 мм, частота – 3÷9 Гц. Час формування становив 90 с. Дослідження проведено на трьох вовняних тканинах пальтової групи виробництва «Камвольно-суконної компанії «Чексіл», Чернігів, Україна. Їх характеристика наведена у таблиці 1.

Таблиця 1

Артикул тканини	Волокнистий склад, %	Система прядіння	Вид переплетення	Коефіцієнт переплетення	Кількість ниток на 10 см		Поверхнева щільність, г/м^2	Товщина тканини, мм	Жорсткість, мкН·см^2		Коефіцієнт драпірувальності, %	
				F	$П_о$	$П_у$	M_s	h	$B_о$	$B_у$	$K_{до}$	$K_{ду}$
7396	вовна 78, ПЕ 22	апаратна	саржа 1/2	3	138	146	292	1,47	8624,8	5899,9	29,0	27,0
8037	вовна 78, ПЕ 22		саржа 2/2	4	133	121	325	1,35	10334,7	6585,0	13,5	1,5
7812	вовна 78, ПЕ 22		саржа 2/2	4	167	115	357	1,75	11177,8	4027,7	20,0	1,0

Для проведення багатофакторного експерименту обрано рототабельне планування другого порядку, оскільки таке планування застосовують у швейній галузі для досить детального дослідження процесу при мінімальній кількості дослідів [9].

У результаті проведення чотирьохфакторного експерименту складено рівняння регресії в кодованому вигляді. Адекватність рівняння підтверджено критерієм Фішера (0,12>3,95; 0,04>3,95; 0,26>3,95). Перевірку значимості розрахованих коефіцієнтів регресії виконано за допомогою критерію Стьюдента (t_{pi} > 0,0012; t_{pi} > 0,0016; t_{pi} > 0,0012). Відповідно до вагомості коефіцієнтів регресії рівняння приймають вигляд:

Тканина арт. 7396

$$y = 0{,}0237 - 0{,}0104\ x_1 - 0{,}0066\ x_2 - 0{,}0057\ x_4 - 0{,}0028\ x_1x_2 + 0{,}0012\ x_1x_3 - 0{,}0028\ x_1x_4 - 0{,}0018\ x_2x_3 - 0{,}0051\ x_2x_4 + 0{,}0019\ x_1^2 + 0{,}0078\ x_2^2 + 0{,}0049\ x_4^2 \quad (2)$$

Тканина арт. 8037

$$y = 0{,}0311 - 0{,}0100\ x_1 - 0{,}0059\ x_2 - 0{,}0058\ x_4 - 0{,}0027\ x_1x_2 + 0{,}0024\ x_1x_3 - 0{,}0016\ x_2x_3 - 0{,}0042\ x_2x_4 + 0{,}0019\ x_3x_4 + 0{,}0047\ x_1^2 + 0{,}0077\ x_2^2 + 0{,}0021\ x_3^2 + 0{,}0021\ x_4^2 \quad (3)$$

Тканина арт. 7812

$$y = 0{,}0271 - 0{,}0094\ x_1 - 0{,}0072\ x_2 - 0{,}0017\ x_3 - 0{,}0059\ x_4 - 0{,}0049\ x_1x_2 + 0{,}0023\ x_1x_3 - 0{,}0038\ x_1x_4 - 0{,}0051\ x_2x_4 + 0{,}0013\ x_3x_4 + 0{,}0027\ x_1^2 + 0{,}0067\ x_2^2 + 0{,}0029\ x_4^2 \quad (4)$$

Відповідно до значень параметрів процесу формування із застосуванням просторової вібрації рівняння (2 – 4) приймають натуральний вигляд :

Тканина арт. 7396

$$K_p = 0{,}161 - 0{,}0030\ A_в - 0{,}0232\ v_в + 0{,}0036\ A_г - 0{,}0108\ v_г - 0{,}0019\ A_в v_в + 0{,}0012\ A_в A_г - 0{,}0019\ A_в v_г - 0{,}0012\ v_в A_г - 0{,}0023\ v_в v_г + 0{,}0019\ A_в^2 + 0{,}0035\ v_в^2 + 0{,}0022\ v_г^2 \quad (5)$$

Тканина арт. 8037

$$K_p = 0{,}2484 - 0{,}0346\ A_в - 0{,}0247\ v_в - 0{,}0210\ A_г - 0{,}0071\ v_г - 0{,}0018\ A_в v_в + 0{,}0024\ A_в A_г - 0{,}0011\ v_в A_г - 0{,}0019\ v_в v_г + 0{,}0013\ A_г v_г + 0047\ A_в^2 + 0{,}0034\ v_в^2 + 0{,}0021\ A_г^2 + 0{,}0009\ v_г^2 \quad (6)$$

Тканина арт. 7812

$$K_p = 0{,}1382 + 0{,}0023\ A_в - 0{,}0171\ v_в - 0{,}0138\ A_г + 0{,}0009\ v_г - 0{,}0033\ A_в v_в + 0{,}0023\ A_в A_г - 0{,}0025\ A_в v_г - 0{,}0023\ v_в v_г + 0{,}0009\ A_г v_г + 0027\ A_в^2 + 0{,}0029\ v_в^2 + 0{,}0013\ v_г^2 \quad (7)$$

Коефіцієнти при незалежних змінних вказують на ступінь впливу факторів. Зі збільшенням чисельної величини коефіцієнта збільшується вплив фактора на показник K_p. Однак для отримання мінімального значення K_p необхідно збільшувати значення фактору при від'ємному знакові коефіцієнту та зменшувати при додатному [9]. На параметр K_p фактори впливають не пропорційно, на що вказує квадратичний ефект.

Раціоналізацію процесу формування об'ємних деталей за допомогою просторової вібрації здійснено за допомогою мінімізації вихідної функції. Для визначення екстремального (мінімального) значення математичних моделей рівняння диференціюють за кожною незалежною змінною. Результати перетворення математичної моделі процесу формування за допомогою просторової вібрації у канонічний вигляд, що дає можливість одержати наочне уявлення про закономірності зміни критерію раціоналізації, приведено на рис. 1-3.

Наведені графічні залежності відображають вплив вхідних параметрів на якість процесу формування. Раціональні значення функцій відгуку K_p зображені мінімумами тобто впадинами. Аналіз динаміки зміни поверхонь відгуку для просторового формування показує, що графічним способом можна визначити області раціональних значень вхідних параметрів.

Аналіз отриманих поверхонь відгуку (рис. 1 – рис. 3) свідчить, що раціональною областю формування є: для тканини арт. 7396: Ав – 4,5÷5 мм, $v_в$ – 8÷9 Гц, Аг – 1÷3 мм, $v_г$ – 8÷9 Гц; арт. 8037: Ав – 4÷5 мм, $v_в$ – 7,5÷8,5 Гц , Аг – 1÷1,5 мм, $v_г$ – 8÷9 Гц; арт.7812: Ав – 4,5÷5 мм, $v_в$ – 8÷9 Гц, Аг – 1÷1,5 мм, $v_г$ – 8÷9 Гц. Із наведених даних видно, що раціональні значення вхідних параметрів близькі за значенням, тому їх можна узагальнити для усіх трьох тканин. В результаті: Ав – 4÷5 мм, $v_в$ – 7,5÷9 Гц, Аг – 1÷3 мм, $v_г$ – 8÷9 Гц.

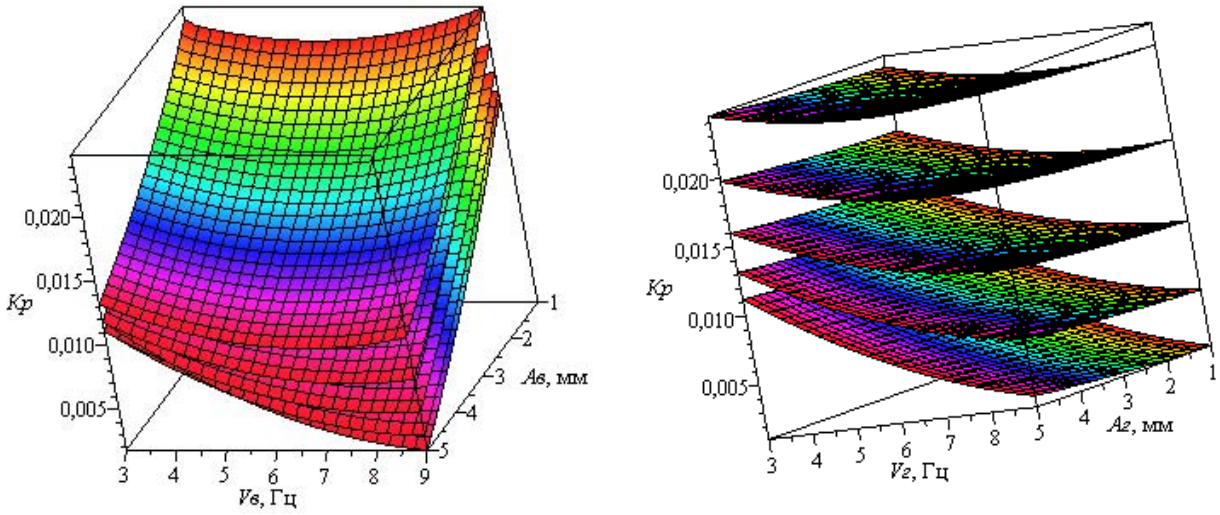


Рис. 1. Динаміка зміни поверхонь відгуку для процесу формування за допомогою просторової вібрації тканини арт. 7396: а – для $A_в$ та $v_в$; б – для $A_г$ та $v_г$

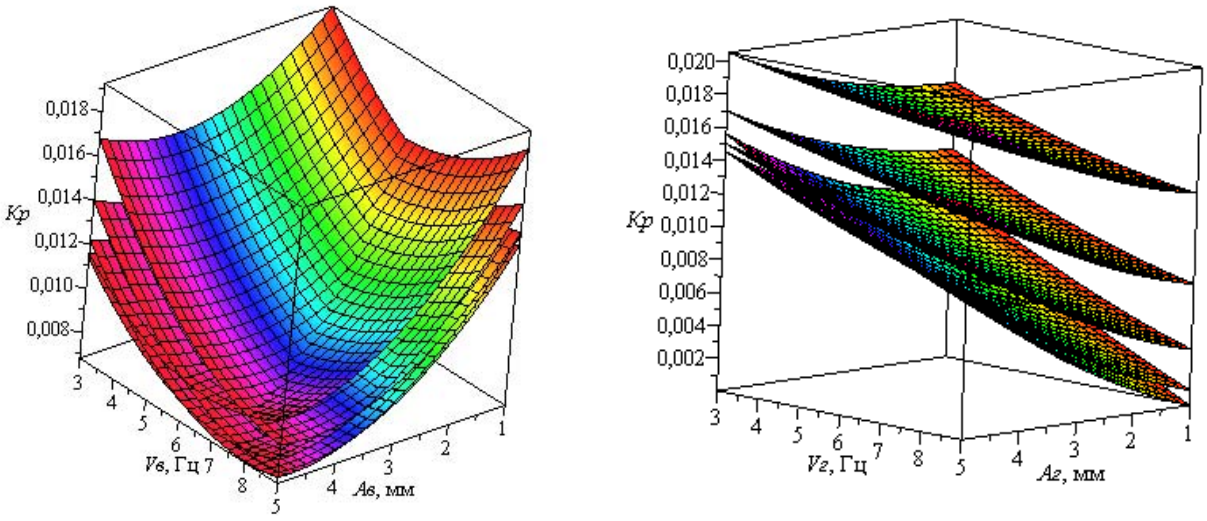


Рис. 2. Динаміка зміни поверхонь відгуку для процесу формування за допомогою просторової вібрації тканини арт. 8037: а – для $A_в$ та $v_в$; б – для $A_г$ та $v_г$

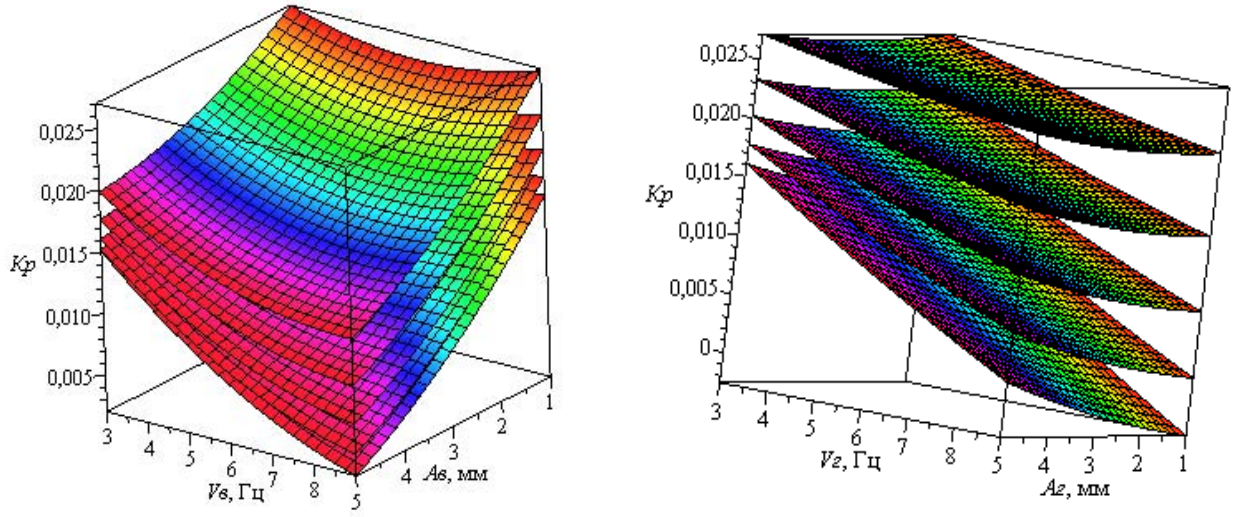


Рис. 3. Динаміка зміни поверхонь відгуку для процесу формування за допомогою просторової вібрації тканини арт. 7812: а – для $A_в$ та $ν_в$; б – для $A_г$ та $ν_г$

Висновки. Визначені раціональні значення параметрів формування за допомогою просторової вібрації, які дозволяють отримати об'ємну форму високої якості із вовняних тканин.

Встановлено, що для обраних тканин, значення раціональних параметрів процесу знаходяться у одних межах, що дозволяє узагальнити останні для усіх тканин, які мають схожі фізико-механічні властивості, та прогнозувати їх якість формування.

Література

1. Смирнова Н.А. Влияние вида переплетения льносодержащих тканей на их способность к формообразованию / Н.А. Смирнова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1997. – № 3. – С. 12–14.

2. Березненко М.П. Нетрадиційні методи формування та формозакріплення деталей одягу / М.П. Березненко, В.В. Корзун, В.О. Слободянюк, С.М. Березненко // Легка промисловість. – 1994. – № 3. – С. 29–30.

3. Кущевський М.О. Дослідження фізичної сутності способу формування текстильних матеріалів / М.О. Кущевський, М.П. Березненко // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – № 5. – С. 100–105.

4. Буханцова Л.В. Механізм гідродинамічного формування деталей швейних виробів / Л.В. Буханцова // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 5. – С. 19–24.

5. Кошевко Ю.В. Розробка обладнання для реалізації процесу формування та закріплення форми головок головних уборів з тканин / Ю.В. Кошевко, М.О. Кущевський, Д.М. Прибега // Вісник Хмельницького національного університету. – 2012. – № 5. – С. 83–87.

6. Войтюк М.В. Універсальна установка для реалізації процесу формування технологією «змінних тисків» / М.В. Войтюк, М.О. Кущевський, І.О. Сідлецький, Ю.В. Кошевко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – № 5. – С. 43–52.

7. Химич Г.М. Експериментальна установка для формування текстильних матеріалів за допомогою вертикальної та горизонтальної вібрації / Г.М. Химич, М.О. Кущевський // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2014. – № 4. – С. 61–65.

8. Химич Г.М. Ефективність застосування вертикальної та горизонтальної вібрації при формуванні головних уборів / Г.М. Химич, М.О. Кущевський // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2015. – № 2. – С. 111–118.

9. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

Рецензія/Peer review : 15.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 004.021

А.П. ПОНОМАРЕНКО
Хмельницький національний університет

КОМПОЗИТНИЙ МЕТОД МАТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ДИЗАЙНЕРСЬКИХ РІШЕНЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВАРІАНТНИХ МОДЕЛЕЙ ТИПОВОГО СИСТЕМНОГО МОДУЛЯ

У статті представлений композитний метод матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля оздоблювальних робіт. Сформована загальна структура типового системного модуля. Визначено доцільність використання даного методу як основи для розробки модуля супроводу облицювальних робіт з подальшою інтеграцією до систем САПР на базі підходу BIM в галузі будівництва та архітектури.

Ключові слова: САПР, блок, модуль, блочна структура, дизайнерські рішення, оздоблення.

A.P. PONOMARENKO
Khmelnytsky National University

COMPOSITE METHOD OF MATRIX SYNTHESIS FOR DESIGN SOLUTIONS TO PROVIDE VARIANT MODELS OF THE TYPICAL SYSTEM MODULE

Abstract - Presentation of the composite matrix synthesis method for designs to provide variant models of the typical system module for finishing works. The article provides with the definitions for the concepts of "composite method", "matrix synthesis", "system module", and others. The overall structure of a typical system module for finishing works has been established based on the composite matrix synthesis method of designs for provision of variant models, using the block construction principle. There has been studied the functionality of the main blocks of the system module, defined structural and functional relationships between individual blocks and block components. The schematics of individual blocks operation have been reviewed. There have been determined the feasibility of using this method as a basis for the development of the facing works support module with further integration into CAD systems based on the BIM approach in construction and architecture.

Keywords: CAD system, CAD, blocks, modules, block structure, designs, finishing works.

Вступ

Питання планування інтер'єру та екстер'єру будівель та споруд з метою забезпечення функціональності та архітектурної виразності є надзвичайно важливою складовою при виконанні проектних та будівельних робіт. Важливу роль в вирішенні цих питань відіграють дизайнерські рішення, які обумовлюють вибір стильового напрямку, кольорової гамми та комбінації елементів освітлення, оздоблення та інших архітектурних елементів.

Існує досить багато різноманітних програмних продуктів по супроводу проектування дизайнерських рішень. Розглянувши сучасний стан основних САПР у галузі будівництва і архітектури та здійснивши аналіз їх функціональних можливостей, відмічено, що в представлених системах відсутні повнофункціональні підсистеми для забезпечення технічних та технологічних складових дизайну, в тому числі процесів супроводу облицювальних робіт [1].

На основі дослідження структури та технологій побудови існуючих САПР визначено необхідність розробки нових програмних продуктів або модулів до існуючих САПР з метою забезпечення повної відповідності з структурою інтегрованих технологій в галузі будівництва та архітектури згідно підходу BIM [2].

Забезпечення технічних та технологічних складових дизайну, в тому числі процесів супроводу облицювальних робіт, може бути виконано побудовою формальної та зручної для подальшої програмної реалізації моделі гнучкої системи, що містить опис усіх утворюючих її об'єктів та зв'язків між ними. Вирішення даного питання може бути реалізовано з використанням композитного методу матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля.

Цілі статті

Метою даної публікації є представлення композитного методу матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля та розгляд його структури. Визначення доцільності використання даного методу як основи для розробки модуля супроводу облицювальних робіт з подальшою інтеграцією до систем САПР на базі підходу BIM в галузі будівництва та архітектури.

Основна частина

Задача розробки системи дизайнерських рішень може бути вирішена шляхом створення багатофункціонального програмного забезпечення, що суміщає врахування значної кількості факторів впливу з високим рівнем автоматизації на основі композитного методу матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля.

У зв'язку з тим, що складові виразу «композитний метод матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля» можуть трактуватись по різному [3–5], а

даній публікації нижче наводяться визначення, ґрунтуючись на які, будується подальший розгляд.

Метод – це систематизована сукупність кроків для досягнення певної мети, що застосовано до будь-якої науково-практичної діяльності. Методи мають тенденцію застарівати, перетворюватись в інші методи, розвиваючись відповідно до досягнень технічної та наукової думки, потреб суспільства.

З величезної кількості методів можна виділити групу комплексних методів, таких як: комбінаторика, ситуаційне моделювання, методи дослідження інформаційних потоків. До них можна віднести також і композитний метод.

Композитний метод – це метод, окремі фази якого виконують специфічні функції, забезпечуючи йому властивості, яких не має жодний з компонентів окремо. Зазвичай містить поєднання двох та більше компонентів, які взаємопов'язані або доповнюють один одного та мають різні властивості (характеристики). Компоненти даного методу поділені на компонент «матриця» (або сполучна) та включені в неї компоненти «елемент».

Таким чином, у композитному методі кожний компонент грає свою специфічну роль: матриця забезпечує гнучкість та єдність системи, компоненти вносять свої технічні та технологічні характеристики.

Фаза композитного методу в даній роботі – це процес проектування оздоблювальних робіт в вибраній області оздоблення.

Структурна схема композитного методу наведена на рис. 1.

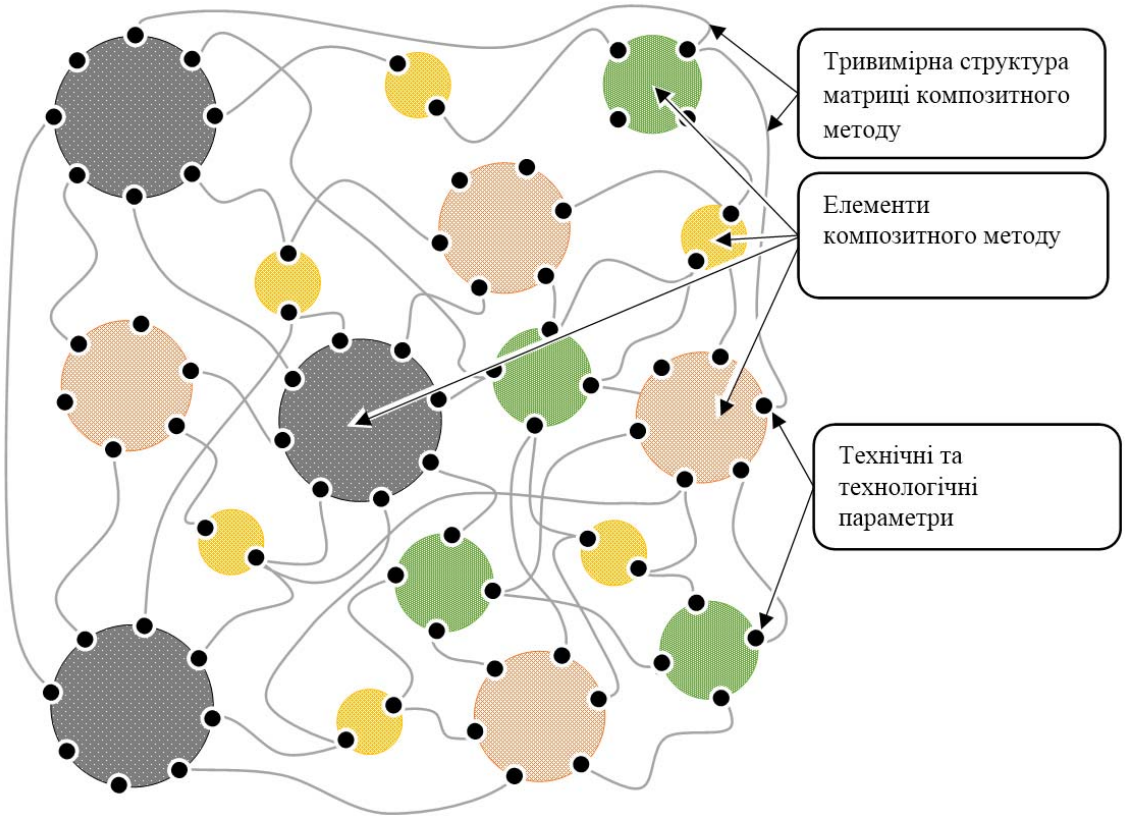


Рис. 1. Структурна схема композитного методу

На рисунку 1 представлено:

- Матриця композитного методу, як основа для взаємозв'язків елементів через їх дані. В даній роботі матрицею композитного методу є поверхня, яка частково або повністю буде підлягати оздобленню. Тобто, при необхідності, враховує наявність отворів та визначає області оздоблення окремими видами матеріалів.
- Елементи композитного методу – це елементи з бази даних оздоблювальних матеріалів, області оздоблювальних робіт та ін.
- Технічні та технологічні параметри – це дані по приміщенням (характеристики), дані по областям оздоблювальних робіт та дані елементів з бази даних оздоблювальних матеріалів.

Матричний синтез. Приклад матричного синтезу в живій природі – біосинтез нуклеїнових кислот і білків, в якому роль матриці грають ДНК і РНК, а склад і порядок чергування залишків мономерів в синтезованому полімері однозначно визначаються будовою матриці [4].

В даній роботі функції матриці виконує система, яка керує взаємозв'язками між різними компонентами (елементами), встановлюючи склад і порядок їх використання при синтезі компонентів (процесі об'єднання компонентів з різними технічними та технологічними характеристиками) в єдину структуру з відповідними параметрами.

Матричний синтез – перспективний метод отримання нових технічних рішень.

Схема принципу дії матричного синтезу наведена на рисунку 2.

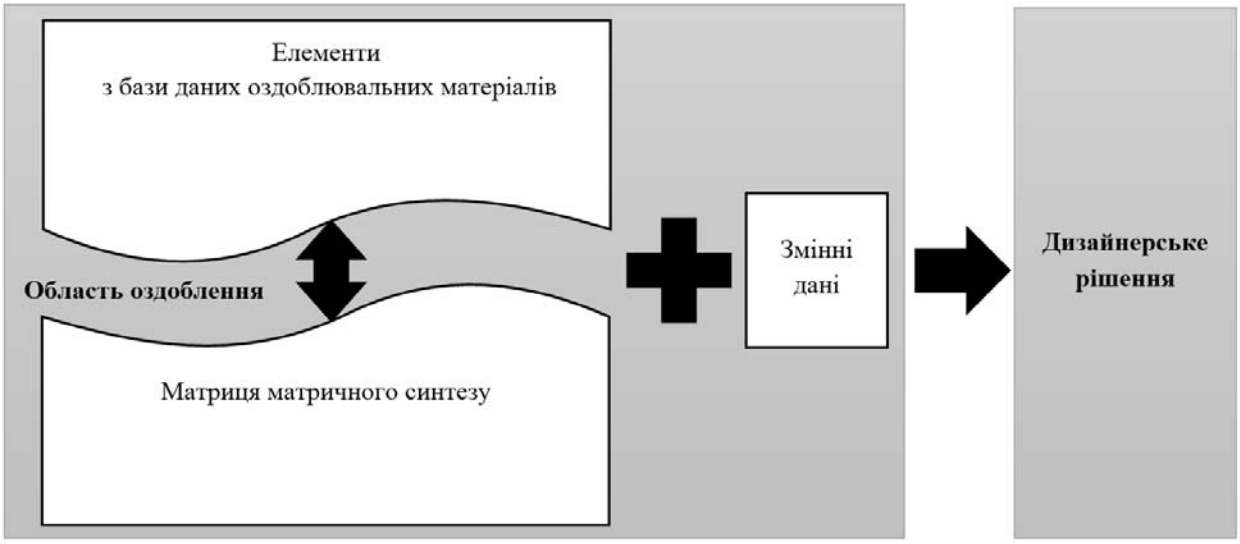


Рис. 2. Схема принципу дії матричного синтезу

На рисунку 2 представлено:

- Матриця матричного синтезу – система управління даними у вибраній фазі композитного методу.
- Область оздоблення – частина площини, яка оздоблюється одним типом матеріалів. Дані по параметрах та характеристиках області оздоблення передаються з композитного методу.
- Елементи з бази даних оздоблювальних матеріалів – елементи для синтезу дизайнерського рішення вибираються з бази даних відповідного матеріалу оздоблення, що передається з композитного методу.
- Змінні дані – це дані, що задаються користувачем для отримання варіантних моделей дизайнерських рішень.
- Дизайнерське рішення – візуальне відображення результату роботи матричного синтезу на окремій області оздоблення.

Системний модуль – це функціонально завершений блок, що виконує функції збору, обробки, контролю, передачі інформації та забезпечує управління системними параметрами.

Він є уніфікованим (типовим) функціональний вузлом системи, який складається з відповідних наборів параметрів для генерації різноманітних варіантних моделей.

Системний модуль має можливість отримувати (обробляти) технічні та технологічні дані компонентів:

а) з відповідної САПР, в яку він може бути інтегрований;

б) з власних баз даних;

в) з даних, введених користувачем.

Системний модуль має можливість передавати готові рішення в САПР, в яку він інтегрований.

Введення користувачем змінних значень відповідних параметрів обумовлюють зміну моделі, таким чином забезпечуючи варіантність моделей типового системного модуля.

Подальший розгляд композитного методу матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля проведемо, використовуючи розроблену схему типового системного модуля на основі даного методу, що наведена на рисунку 3.

Структура типового системного модуля складається з декількох взаємодіючих блоків (підсистем). Кожна підсистема являє собою набір взаємопов’язаних вузлів та компонентів, які виконують визначені процеси в залежності від функцій підсистеми, в якій знаходяться. Входячи в склад загальної системи (структури системного модуля), підсистеми забезпечують реалізацію заданих функціональних можливостей типового системного модуля.

В загальній структурі типового системного модуля передбачено наступні основні функціонально незалежні, але взаємопов’язані блоки:

1. Блок вхідних даних
2. Блок збору вхідних даних
3. Блок обробки даних
4. Блок змінних даних
5. Блок графічного представлення результатів

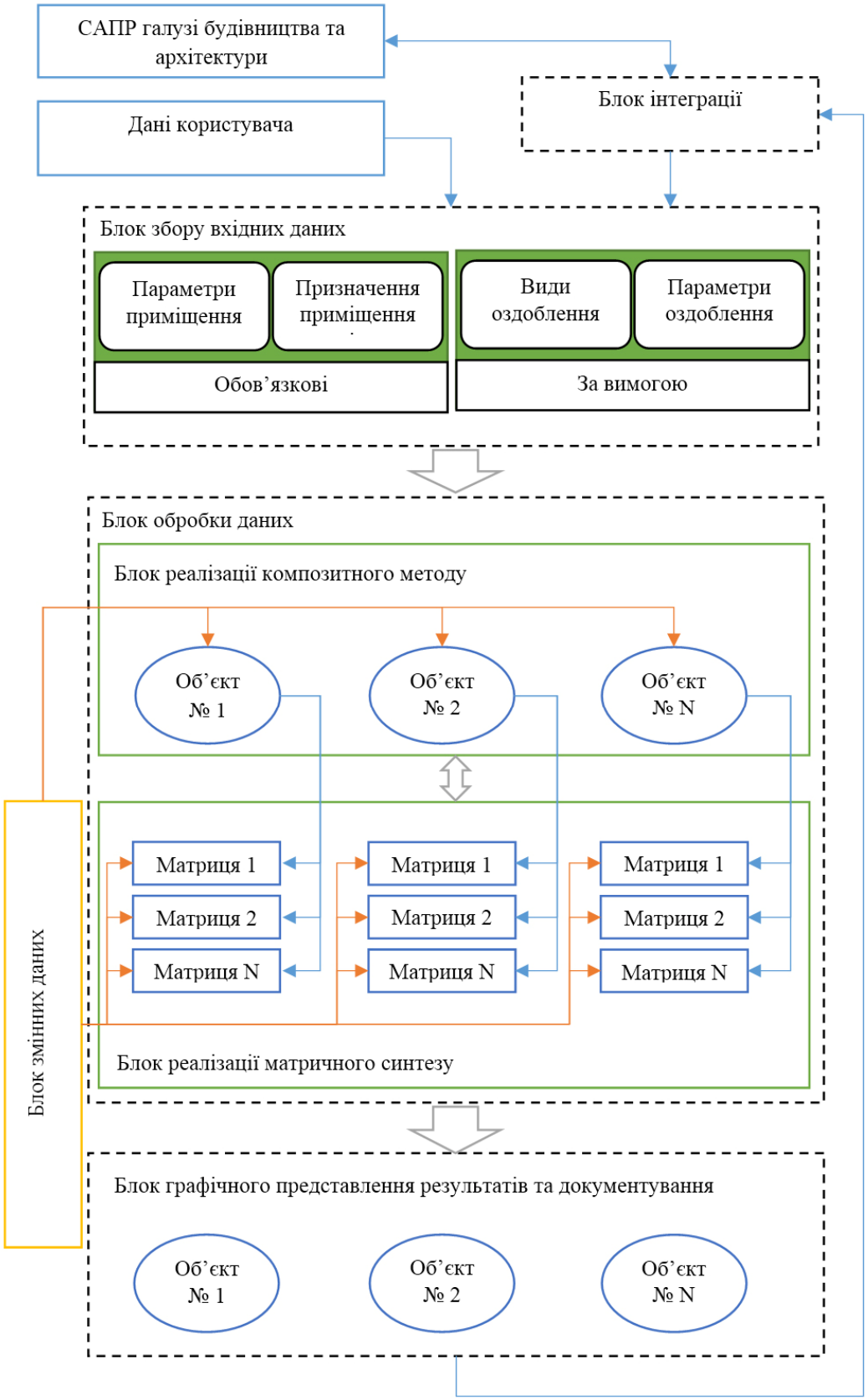


Рис. 3. Схема зав'язків композитного методу матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля

Короткий опис призначення та функціональних можливостей блоків загальної структури типового системного модуля.

1. Блок вхідних даних

Блок вхідних даних призначений для отримання вхідних даних від двох незалежних джерел

інформації:

а) Отримання даних з САПР архітектури та будівництва через блок інтеграції. В складі цих даних – інформація по параметрах приміщень (будівлі) та необхідні технологічні дані (призначення, види оздоблення, параметри оздоблення та ін.).

Блок інтеграції забезпечує імпорт та конвертацію необхідних даних з САПР архітектури та будівництва в дані, прийнятні для обробки модулем, а також конвертацію та експорт в САПР архітектури та будівництва даних по результатах роботи модуля.

б) Задавання даних користувачем. Передбачається можливість індивідуального введення параметрів приміщень для створення оперативної бази робочих площин (2D) та створення каркасу (3D модель). Також вводяться необхідні технологічні дані (призначення, види оздоблення, параметри оздоблення та ін.). За необхідності передбачена можливість створення індивідуальних елементів оздоблення метою їх використання при проектуванні дизайнерських рішень.

2. Блок збору вхідних даних

Блок збору вхідних даних отримує вхідні дані, проводить їх перевірку на відповідність встановленим критеріям, виконує поділ та сортування за призначенням та передає в блок обробки даних. При введені некоректних даних (або в неповному обсязі) видається відповідна інформація на блок вхідних даних.

3. Блок обробки даних

Блок обробки даних в свою чергу складається з двох внутрішніх блоків реалізації: композитного методу та матричного синтезу. Також блок обробки даних тісно взаємодіє з блоком змінних даних, що забезпечує варіантність моделей оздоблення.

Блок реалізації композитного методу отримує дані по параметрах приміщень (будівлі) та необхідні технологічні дані (призначення, види оздоблення, параметри оздоблення та ін.) забезпечуючи створення загального каркасу приміщення, поділ каркасу на окремі площини приміщень (матриці) такі як стіни, стеля, підлога, перегородка і т.д. з врахуванням отворів. Виконує поділ матриць на фази оздоблення в залежності від видів та параметрів областей оздоблення. Підключає бази даних з оздоблювальними матеріалами до фаз оздоблення в залежності від технологічних даних приміщення (напр.: призначення приміщення). Отримує результати роботи фаз оздоблення від блоку матричного синтезу, проводить їх композицію на вихідній матриці та виконує візуалізацію отриманої композиції.

В блоці реалізації композитного методу передбачена можливість зміни користувачем параметрів зон оздоблення, якщо вони не задані через параметри САПР. При цьому мається на увазі, що параметри, задані через САПР, враховуються як фіксовані, тобто не підлягають зміні. Якщо виникає потреба в коригуванні цих параметрів, то вони повинні бути відкориговані в архітектурно-будівельних кресленнях.

Блок реалізації матричного синтезу отримує дані з блоку реалізації композитного методу, на основі цих даних будує матриці відповідних фаз оздоблення, визначає склад, вид, порядок використання компонентів (елементів) з бази даних оздоблювальних матеріалів. Розташовує компоненти (елементи) на матриці (процес синтезу), забезпечуючи оптимізацію виконання оздоблювальних робіт згідно заданих вхідних даних. Передає результати матричного синтезу відповідної фази оздоблення в блок реалізації композитного методу.

В блоці реалізації матричного синтезу передбачена можливість введення користувачем додаткових (змінних) параметрів, необхідних для виконання варіантних рішень оздоблення.

Схема принципу дії блоку обробки даних наведена на рисунку 4.

На рисунку 4 наведена схема принципу дії блоку обробки даних на прикладі приміщення, в якому виділяються 6 компонентів (4 стіни, стеля та підлога). Далі кожен компонент проходить обробку (поділ на фази в залежності від заданих областей оздоблення) для подальшої генерації дизайнерського рішення.

При розробці дизайнерського рішення використовується інформація з бази даних (вибірка даних виконується в залежності від типу приміщення та типу оздоблення фази) та коригуючі дані, введені користувачем.

4. Блок змінних даних

Блок змінних даних призначений для введення додаткової інформації до блоків реалізації композитного методу та матричного синтезу з метою забезпечення варіантних моделей типового системного модуля.

В блок реалізації композитного методу передбачається можливість введення наступних даних:

а) параметри оздоблювальних фаз (розмір, форма);

б) кількість оздоблювальних фаз;

в) зміна виду матеріалу оздоблення в вибраній фазі.

В блок реалізації матричного синтезу передбачається можливість введення наступних даних:

а) вибір оздоблювальний матеріал з каталогу (бази даних);

б) введення точки відліку, початку роботи (розташування) елементів оздоблення;

в) введення кута повороту оздоблювального елементу;

г) поділ матриці на зони оздоблення (при необхідності);

д) задавання додаткових параметрів розміщення елементів (ширина шва, колір фуги і т.п.)

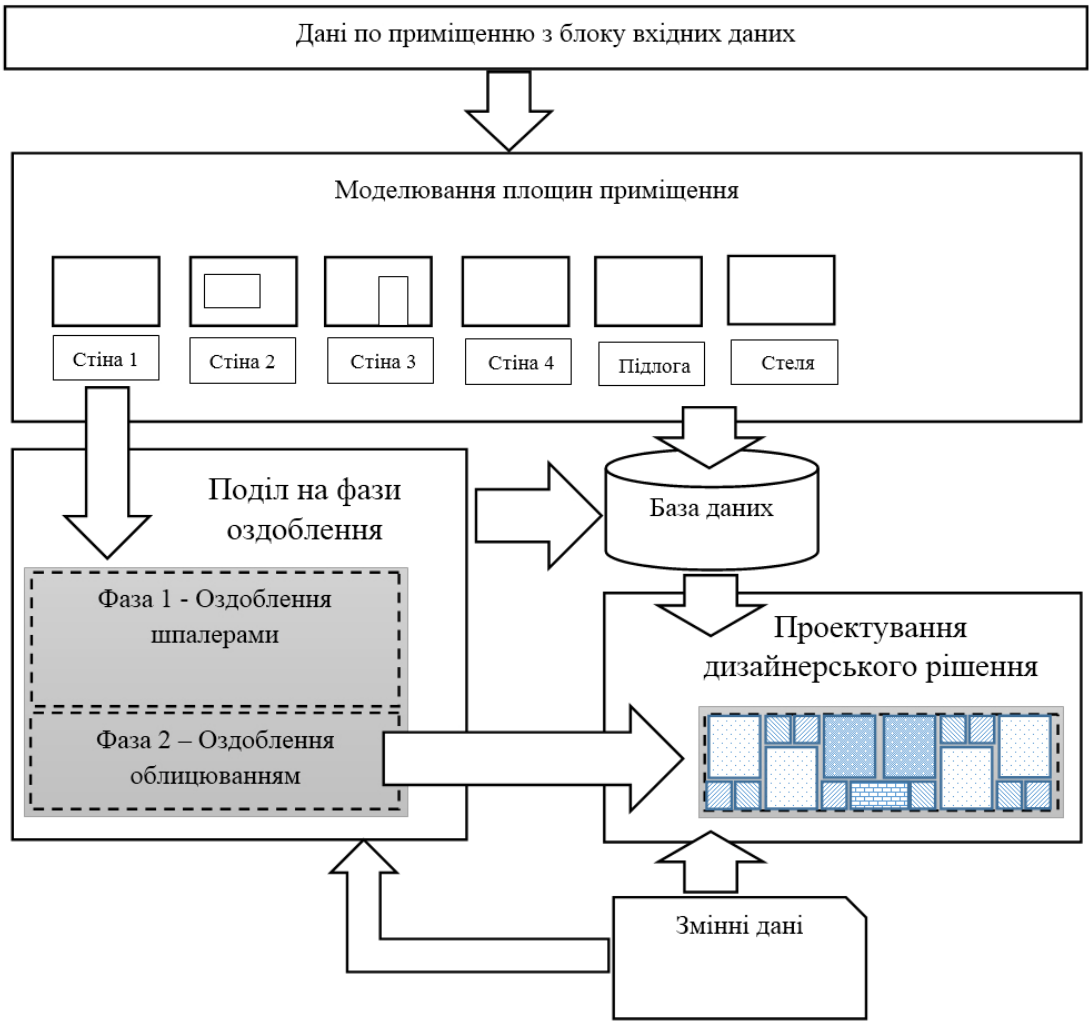


Рис. 4. Схема принципу дії блоку обробки даних

5. Блок графічного представлення результатів та документування

Даний блок забезпечує візуальне відображення скомпонованої моделі дизайнерського рішення в 2D та 3D просторах. Передбачена можливість повернення до блоку обробки даних для внесення коригуючих змін. Проводить обрахунок матеріалів, необхідних для виконання оздоблювальних робіт, формує документацію (специфікації, креслення, відомості матеріалів і т.д.) в тому числі кошторис матеріалів, використовуючи базу даних матеріалів. Забезпечує можливість створення файлів (в тому числі графічних) та друк сформованих документів. Передбачена функція передачі вихідних даних (розрахунків, специфікацій, креслень та параметрів елементів 3D моделі) в САПР архітектури та будівництва через блок інтеграції.

На основі розглянутого композитного методу матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення варіантних моделей типового системного модуля виконана розробка та проводиться тестування модуля супроводу облицювальних робіт. При створенні програмного продукту ключовим фактором прийнята максимальна функціональна відповідність програмного забезпечення облицювальних робіт, яка реалізується шляхом створення багатофункціонального модуля.

Для побудови моделі програмної реалізації багатофункціонального модуля, що містить опис усіх об'єктів, зв'язків між ними та їх станів на всіх етапах проектування використовується одна з найбільш ефективних методологій дослідження і моделювання складних предметних областей – об'єктно-орієнтований аналіз, що дозволяє на відміну від традиційних технологій програмування розробляти всі алгоритми і процедури відповідно до законів математичних абстракцій.

Висновки

Розглянувши наведену блочну структуру типового системного модуля, призначення блоків (складових блоків), їх функціональні можливості та зв’язки між ними, можна зробити наступні висновки:

Для подальшої програмної реалізації гнучкої системи моделі типового системного модуля оздоблювальних робіт, що містить опис усіх утворюючих її об’єктів та зв’язків між ними, доцільно використати наведену блочну структуру типового системного модуля, яка передбачає можливість інтеграції до систем САПР на базі підходу BIM в галузі будівництва та архітектури.

Використання композитного методу матричного синтезу дизайнерських рішень забезпечення

варіантних моделей типового системного модуля, як основи для розробки модуля супроводу оздоблювальних робіт (в тому числі облицювальних), є доцільним і забезпечить необхідні технічні та технологічні складові дизайну оздоблювальних робіт.

Література

1. Пономаренко А. П. Аналіз функціональних можливостей програмних продуктів у галузі будівництва та архітектури / А. П. Пономаренко, С. С. Ковальчук // Научная дискуссия: Вопросы технических наук. – 2015. – № 5.

2. Пономаренко А. П. Інформаційні технології в сучасних обчислювальних системах та комплексах будівництва і архітектури / А. П. Пономаренко, С. С. Ковальчук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 5. – С. 222–226.

3. Словник української мови. – К. : Наукова думка, 1970. – 692 с. – (АН УРСР. Інститут мовознавства).

4. Кабанов В. А. Высокомолекулярные соединения / В. А. Кабанов, И. М. Паписов. – М., 1979. – 243 с.

5. Блюмин А. М. Теория систем и системный анализ / А. М. Блюмин. – М. : ИГУПиТ, 2006. – 86 с.

Рецензія/Peer review : 19.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., професор, Сорокатий Руслан Володимирович

УДК 685.31

О.В. СКІДАН., В.В. СКІДАН
Київський національний університет технологій та дизайну

ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ АНТРОПОМЕТРИЧНИМИ ОЗНАКАМИ СТОП ДІТЕЙ-ШКОЛЯРІВ

У статті наведені результати антропометричних досліджень стоп дітей-школярів та визначені кореляційні залежності в розмірних параметрах стоп з урахуванням змін в їх розмірах та формі. Для цього були перевірені чотири закони, яким підлягали різні розмірні ознаки стоп: довжинні, широтні, висотні та обхватні параметри. Отримана інформація в подальшому буде врахована при проектуванні внутрішньої форми і розробці раціонального взуття.

Ключові слова: стопа, внутрішня форма, взуття.

O.V. SKIDAN, V.V. SKIDAN
Kyiv national university of technologies and design

DETERMINATION AND ANALYSIS OF CORRELATION DEPENDENCES BETWEEN ANTHROPOMETRIC CHARACTERISTICS OF SCHOOLCHILDREN FEET

Abstract – *The article presents the results of anthropometric studies of schoolchildren feet and the correlation dependences in dimensional parameters of schoolchildren feet with changes in their size and shape were determined. Four laws were tested for different feet dimensional signs: length, latitudinal, altitudinal and girth settings. The information will be taken into account in the future while designing internal forms and the development of rational footwear.*

Keywords*: foot, parameters, rational footwear.*

Постановка проблеми

Одним з найважливіших показників якості взуття для дітей-школярів є його зручність, яка визначається в значній мірі відповідністю форми та розмірів стопи внутрішній формі взуття. Крім того, за останні десятиріччя, внаслідок впливу процесу акселерації спостерігається зміна параметрів довжини, ширини та обхватів стоп дітей-школярів .

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Передумовою виробництва раціонального взуття, як відомо, є наявність необхідної чисельної та різноманітної інформації, яка безпосередньо пов’язана з формою, розміром, станом і роботою стопи людини. Така інформація може бути отримана завдяки проведенню антропометричних досліджень стоп [1–4].

Формулювання мети дослідження

Метою наших досліджень було проведення антропометричних обмірів стоп хлопчиків та дівчаток 12–13 років, визначення кореляційних залежностей в розмірних параметрах стоп з подальшим використанням отриманих даних для проектування внутрішньої форми та взуття для даної групи споживачів.

Викладення основного матеріалу

Дітей віком 12–13 років можна вважати самою специфічною цільовою групою споживачів. Взуття для даної вікової групи представляє собою окремий, досить затребуваний сегмент ринку. Але в наш час недоліком асортиментної політики підприємств є мінімальний випуск взуття для даної групи споживачів.

Сучасне виробництво взуття для дітей-школярів пов'язане з використанням переважно імпортних колодок, які за формою та розмірами не відповідають стопам школярів України.

За результатами антропометричного дослідження були встановлені закономірності між різними параметрами стоп школярів для подальшого використання їх при проектуванні колодок та взуття.

Для наочного уявлення варіаційного ряду велике значення мають його графічні зображення. Так варіаційний ряд може бути зображений у вигляді полігона, гістограми та кумуляти.

Гістограма та полігон розподілення є графічним відображенням частот, які в свою чергу являють собою оцінки щільності ймовірності. Кумулятивну криву отримують під час зображення варіаційного ряду з накопиченими частотами в прямокутній системі координат.

Перевірку характеру розподілення визначено різними способами [5]:

По середньому абсолютному відхиленню *d* за формулою:

$$d=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_i-\bar{x}\right|}{n} \tag{1}$$

d = 1948,34/220=8,86.

Для вибірки, що має приблизно нормальний закон розподілу, має бути справедлива нерівність:

$$\left|\frac{d}{\sigma}-0,7979\right|<\frac{0,4}{\sqrt{n}} \tag{2}$$

Таким чином, $\left|\frac{8,86}{10,50}-0,7979\right|<\frac{0,4}{\sqrt{220}}$; 0,0459<0,0268.

Отже, гіпотеза нормальності розподілу вибірки даних може бути прийнята.

Жоден емпіричний розподіл антропометричних ознак, як правило, не має точного співпадіння з теоретичною кривою нормального розподілу. Але деяке уявлення про близькість емпіричного розподілу до нормального може надати аналіз асиметрії та ексцесу.

Незміщені оцінки для асиметрії (A) та ексцесу (E) визначаються за формулами:

$$G_A=\frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2}\cdot A, \tag{3}$$

$$G_E=\frac{n-1}{(n-2)\cdot(n-3)}\left[(n+1)\cdot E+6\right], \tag{4}$$

де n – обсяг експериментальної вибірки.

Для перевірки гіпотези про нормальність розподілу також розраховане середнє квадратичне відхилення показників асиметрії S_A та ексцесу S_E:

$$S_A=\sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}}, \tag{5}$$

$$S_E=\sqrt{\frac{24n(n-1)^2}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)}}, \tag{6}$$

де n – об’єм експериментальної вибірки.

Якщо $|G_A|\le 3S_A$ та $G_E\le 5S_E$, то гіпотеза нормальності емпіричного розподілу може бути прийнята.

Перевіримо, наприклад, гіпотезу нормальності емпіричного розподілу довжини стоп хлопчиків.

Незміщені оцінки для асиметрії (A) та ексцесу (E) у даному випадку будуть дорівнювати:

$$G_A=\frac{\sqrt{220\ (220-1)}}{220-2}\cdot 0,2=0,202;$$

$$G_E=\frac{220-1}{(220-2)(220-3)}\left[(220+1)(-0,14)+6\right]=-0,100.$$

Середнє квадратичне відхилення показників асиметрії та ексцесу будуть дорівнювати: $S_A=\sqrt{\frac{6\cdot 220\ (220-1)}{(220-2)(220+1)(220+3)}}=0,209$, $S_E=\sqrt{\frac{24\cdot 220(220-1)^2}{(220-3)(220-2)(220+3)(220+5)}}=0,327$.

Тоді, $3S_A=0,627$, а $5S_E=2,065$

У даному випадку 0,202<0,627 та 0,100<2,065; отже, виконання наданих умов свідчать про те, що гіпотеза про нормальність розподілу такої розмірної ознаки, як довжина стоп хлопчиків, може бути прийнята.

Аналогічно були проаналізовані асиметрія та ексцес основних розмірних ознак стоп дівчаток.

Для більш ґрунтовної перевірки нормальності розподілу був використаний критерій Пірсона (χ^2):

$$\chi^2=\sum_{(\text{усіх класів})}\frac{(f_i-\overline{f_i})^2}{\overline{f_i}}, \tag{7}$$

де f_i – емпіричні частоти у кожному *i*-му класі значень ознак;

$\overline{f_i}$ – теоретичні частоти у кожному *i*-му класі значень ознак.

Для перевірки цього положення нами був проведений розрахунок й оцінка відповідності емпіричних та теоретичних частот за критерієм χ^2 розподілення довжини стопи ($Д_{ст}$) для хлопчиків (табл. 1).

Класовий інтервал розраховується за формулою: $d_x = \frac{\max - \min}{k}$, де max та min – відповідно максимальне та мінімальне значення параметру розмірної ознаки вибірки; k = 10 або 15. У даному випадку $d_x = \frac{264 - 209}{15} = 3{,}66 \approx 4$ (мм).

Для визначення кількості класів крайні частоти теоретичного ряду, які мають число менше 5 об'єднано в один клас із суміжним. Відповідно об'єднанню частот теоретичного ряду об'єднують частоти у емпіричному ряді. Тоді значення числа класів *R* для визначення кількості ступенів свободи визначають після об'єднання у класи.

Таблиця 1

Визначення критерію χ^2 для вибірки по $Д_{ст}$ хлопчиків

Номер класу	Межа класових інтервалів, мм	Середина інтервалів *x*, мм	f_i	Функція $f(t)$	$\overline{f_i}$	$\frac{(f_i - \overline{f_i})^2}{\overline{f_i}}$
1	218–222	22	8	0,0804	5	0,560554
2	223–227	22	10	0,1518	12	0,700692
3	228–232	23	14	0,2468	17	0,645165
4	233–237	23	22	0,3391	22	2,414332
5	238–242	24	28	0,3932	26	4,77604
6	243–247	24	22	0,3885	23	0,999762
7	248–252	25	16	0,3251	17	0,136528
8	253–257	25	10	0,2323	10	0,005058
9	258–262	26	6	0,1394	4	0,003068
∑			136		136	2,6

Для даного емпіричного розподілу (табл.1) кількість ступенів свободи дорівнює $dx=R-3=9-3=6$. Для даного ступеню свободи за таблицею межові значення χ^2 складають: $P_{0,05}=12{,}6$; $P_{0,01}=16{,}8$; $P_{0,001}=22{,}5$. Значення критерію Пірсона, яке ми отримали $\chi^2 = 5{,}12$ не перевищує першого рівня значущості, отже, розподіл довжини стоп в даній вибірці можна вважати нормальним.

Отже, за результатами позитивних оцінок двох показників (асиметрії і ексцесу, а також критерію Пірсона) можна стверджувати, що емпіричне розподілення такої розмірної ознаки, як довжина стоп хлопчиків, наближається до нормального розподілу. Аналогічно були визначені критерій Пірсона для емпіричного розподілення основних розмірних ознак стоп дівчат. На рис. 1, як приклад, наведено емпіричне та теоретичне розподілення довжини стоп у хлопчиків.

Рис. 1. Емпіричне та теоретичне розподілення довжини стоп у хлопчиків

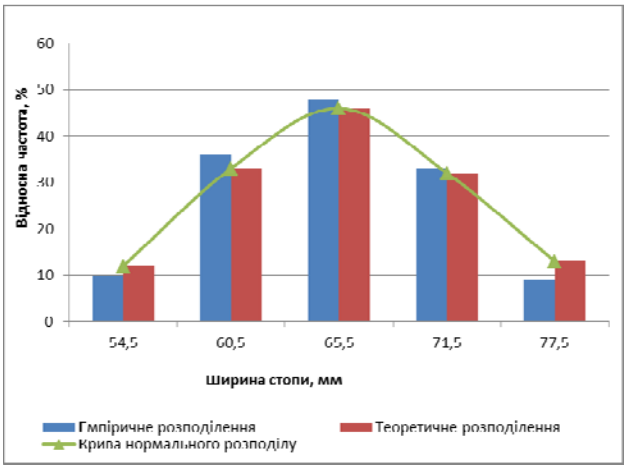


Рис. 2. Емпіричне та теоретичне розподілення ширини стоп у хлопчиків

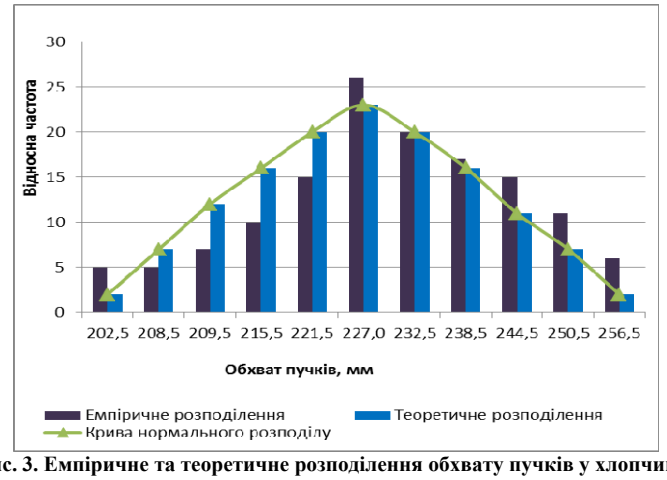


Рис. 3. Емпіричне та теоретичне розподілення обхвату пучків у хлопчиків

Перевірка гіпотези про нормальне розподілення розмірних ознак стоп хлопчиків та дівчаток (віком від 12 до 13 років) дала змогу зробити висновок, що розподілення частот довжинних, широтних, висотних та обхватних параметрів їхніх стоп з максимальною ймовірністю виражається законом нормального розподілення.

У таблицях 2 та 3 наведені статистичні характеристики основних розмірних ознак, коефіцієнти їх кореляційної та регресійної залежності для хлопчиків та дівчаток.

Таблиця 2

Статистичні характеристики основних параметрів стопи та коефіцієнти залежності $r_{y/x}$, $R_{y/x}$ для хлопчиків та дівчаток

Група	Основні параметри стоп	Статистичні характеристики, мм		Коефіцієнт прямої залежності				Коефіцієнт оберненої регресії	
		$Mx \pm m_x$	σ	З довжиною стопи ($Д_{ст}$)		З обхватом у пучках ($О_п$)		з $Д_{ст}$	з $О_п$
				$r_{y/x}$	$R_{y/Д}$	$r_{y/x}$	$R_{y/O}$	$R_{Д/x}$	$R_{O/x}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Хлопці 12-13 років	$Д_{ст}$	242,1±1,5	12,3	-	-	0,52	0,37	-	0,63
	$Ш_п$	81,3±1,0	8,5	0,52	0,29	0,58	0,28	0,61	2,74
	$Ш_{п`ят}$	56,9±0,75	6,1	0,57	0,23	0,66	0,36	0,55	1,30
	$О_п$	200,9±10,1		0,63	0,27	-	-	0,37	-
	$В_{г1п/к}$	32,9±0,3	2,4	0,55	0,11	0,53	0,34	2,83	11,52
	$В_{т.зг.}$	70,79±0,7	5,4	0,61	0,18	0,59	0,41	0,94	1,68
Дівчата 12-13 років	$Д_{ст}$	233,4±2,3	15,6	-	-	0,69	0,65	-	0,73
	$Ш_п$	78,45±0,9	78,5	0,61	0,23	0,72	0,26	1,61	2,00
	$Ш_{п`ят}$	55,3±0,5	55,3	0,52	0,12	0,63	0,14	2,18	2,79
	$О_п$	227,7±2,4		0,69	0,76	-	-	0,65	-
	$В_{г1п/к}$	31,1±0,3	2,36	0,74	0,11	0,62	0,09	4,86	4,31
	$В_{т.зг.}$	67,6±1,1	7,65	0,58	0,28	0,53	0,25	1,17	1,14

Таблиця 3

Рівняння ортогональної регресії основних параметрів стоп хлопчиків та дівчаток 12–13 років

Параметри стопи	Хлопчики	Дівчата
	Рівняння ортогональної регресії	Рівняння ортогональної регресії
1	2	3
Шп	$Ш_п$=0,35Дст+8,1	$Ш_п$=0,33Дст+8,5
$Ш_{п`ят}$	$Ш_{п`ят}$=0,28Дст-2,6	$Ш_{п`ят}$=0,28-1,8
$О_п$	$О_п$=0,92Дст+4,2	$О_п$=0,9Дст+10,3
$О_{пр.під.}$	$О_{пр.під.}$=0,96Дст+4,2	$О_{пр.під.}$=0,93Дст+10,1
$В_{г1п/к}$	$В_{г1п/к}$=0,18Дст-10,7	$В_{г1п/к}$= 0,16Дст-6,1
$В_{т.зг.}$	$В_{т.зг.}$=0,35Дст-13,9	$В_{т.зг.}$=0,32Дст-7,0

На рис. 4 зображений графік прямої, оберненої та ортогональної регресії довжини стопи з обхватом у пучках хлопчиків.

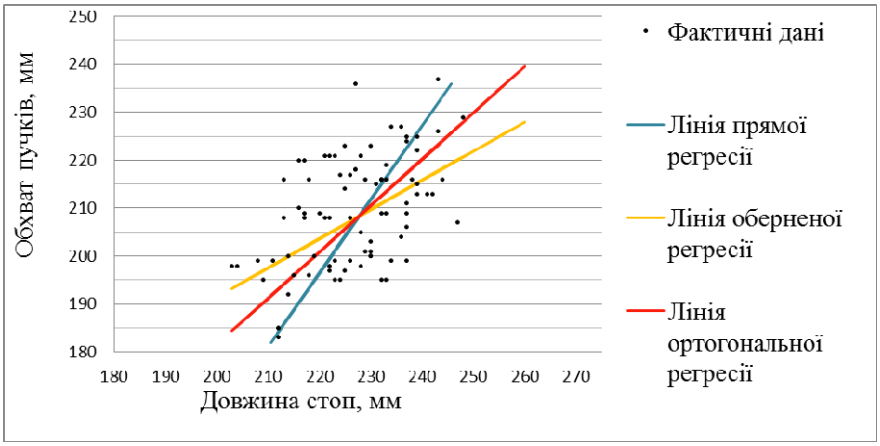


Рис. 4. Графік залежності довжини стопи (мм) з обхватом у пучках (мм) хлопчиків

Таким чином, як видно обхватні та широтні розміри стопи хлопчиків та дівчат пов'язані з їх довжиною ортогональною регресійною залежністю, яка має вигляд:

$$O_{П} = tg\,\alpha_1 \cdot Дст + b_1, \quad (8)$$

$$Ш_{П} = tg\,\alpha_2 \cdot Дст + b_2 \quad (9)$$

Тобто були підтвердженні положення Коновала В.П., про ортогональну регресійну залежність між поперечними розмірами хлопчиків та дівчаток та їхньою довжиною стопи.

За даними антропометричних досліджень стоп хлопчиків та дівчаток, проведено кореляційний та регресійний аналіз залежностей між однойменними розмірами стоп. Величини значення емпіричних коефіцієнтів кореляції $r_{y,x}$ та регресії $R_{y,x}$ наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти кореляційної $r_{y,x}$ та регресійної $R_{y,x}$ залежності між однойменними розмірами стоп хлопчиків та дівчаток 12-13 років

Розмірні ознаки стоп	Коефіцієнти кореляції $r_{y,x}$ та регресії $R_{y,x}$							
	З довжиною стопи ($Д_{ст}$)				З обхватом у пучках ($О_п$)			
	Хлопчики		Дівчатка		Хлопчики		Дівчатка	
	$r_{y,x}$	$R_{y,x}$	$r_{y,x}$	$R_{y,x}$	$r_{y,x}$	$R_{y,x}$	$r_{y,x}$	$R_{y,x}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Д_{0,9}$	0,86	0,90	0,91	0,98	-	-	-	-
$Д_{0,73}$	0,90	0,76	0,94	0,76	-	-	-	-
$Д_{0,62}$	0,80	0,65	0,87	0,63	-	-	-	-
$Д_{0,18}$	0,52	0,32	0,63	0,25	-	-	-	-
$Ш_{вн.п}$	0,42	0,29	0,61	0,23	0,45	0,22	0,66	0,45
$Ш_п$	0,37	0,27	0,52	0,32	0,56	0,34	0,60	0,40
$О_{вн.п}$	0,69	0,43	0,62	0,48	0,87	0,60	0,90	0,70
$О_{зовн.п}$	0,85	0,60	0,72	0,52	0,94	0,74	0,91	0,69
$О_{пятк.згин}$	0,91	0,72	0,63	0,40	0,89	0,65	0,93	0,73

Відомо, що значення коефіцієнтів кореляції визначає, як тісно пов'язані емпіричні параметри лінійної залежності [6]. При позитивній залежності між ними коефіцієнт кореляції $r_{y,x}$ приймає значення від

0 до 1. Чим ближче $r_{y,x}$ до одиниці, тим ближче емпірична залежність до функціональної [7, 8].

Згідно значень коефіцієнтів кореляції, наведених у таблиці 4, можна зробити висновок, що між довжиною стопи ($Д_{ст}$) та іншими розмірами по довжині – $Д_{0,9}$ (довжина до середини 1-го пальця), $Д_{0,73}$ (довжина до внутрішнього пучка), $Д_{0,62}$ (довжина до зовнішнього пучка) існує статистичний зв'язок з високим коефіцієнтом кореляції $r_{y,x}$, який у дівчаток – від 0,63 до 0,94 . Але для різнойменних розмірів – $Д_{ст}$ з обхватними та широтними розмірами, значення коефіцієнта кореляції $r_{y,x}$ – від 0,52 до 0,72.

Значення коефіцієнтів кореляції між обхватом у пучках ($О_{п}$) та іншими поперечними розмірами – $Ш_{вн.п}$ (ширина по внутрішньому пучку), $Ш_{п}$ (ширина п'ятки), $О_{вн.п}$ (обхват по внутрішньому пучку), $О_{п.ятк.згин}$ (обхват через п'ятку та точку згину стопи), $О_{зовн.п}$ (обхват по зовнішньому пучку) теж високий від 0,37 до 0,91, що підтверджує тісний статистичний зв'язок.

Наявність кореляційних зв'язків між однойменними розмірами стоп ще не дає можливість стверджувати, що зв'язок між цими параметрами суттєвий.

Для основних параметрів стоп хлопчиків та дівчаток були розраховані значення середніх квадратичних похибок коефіцієнтів кореляції $\Delta\sigma_{r_{y,x}}$ й регресії $\Delta\sigma_{R_{y,x}}$ та їх довірчі інтервали. У табл. 5 наведено отримані результати.

Таблиця 5

Оцінка $r_{y,x}$ та $R_{y,x}$ між однойменними розмірами стоп хлопчиків та дівчаток

Залежність між однойменними розмірами стоп		Похибка середнього квадратичного відхилення		Довірчий інтервал		Показник суттєвості зв'язків
		$\Delta\sigma_{r_{y,x}}$	$\Delta\sigma_{R_{y,x}}$	$r_{y,x}$	$R_{y,x}$	a_r
Для хлопчиків						
$Д_{ст}$ та довжинними параметрами	$Д_{0,9}$	0,022	0,016	0,82÷0,90	0,87÷0,93	39
	$Д_{0,73}$	0,016	0,036	0,87÷0,93	0,69÷0,83	56,3
	$Д_{0,62}$	0,031	0,050	0,74÷0,86	0,55÷0,75	25,8
	$Д_{0,18}$	0,062	0,077	0,40÷0,64	0,17÷0,47	8,4
$О_{п}$ та іншими поперечними розмірами	$Ш_{в.п}$	0,068	0,082	0,29÷0,55	0,13÷0,42	6,2
	$Ш_{п}$	0,059	0,076	0,26÷0,48	0,13÷0,41	6,3
	$О_{в.п}$	0,055	0,016	0,59÷0,79	0,40÷0,46	12,5
	$О_{з.п}$	0,039	0,015	0,78÷0,92	0,63÷0,57	21,8
	$О_{п.з}$	0,050	0,012	0,81÷0,97	0,70÷0,74	18,2
Для дівчаток						
$Д_{ст}$ та довжинними параметрами	$Д_{0,9}$	0,071	0,004	0,77÷0,97	0,97÷0,99	12,8
	$Д_{0,73}$	0,012	0,042	0,92÷0,96	0,68÷0,84	78,3
	$Д_{0,62}$	0,024	0,060	0,82÷0,92	0,51÷0,75	36,3
	$Д_{0,18}$	0,089	0,096	0,26÷0,60	0,23÷0,43	4,8
$О_{п}$ та іншими поперечними розмірами	$Ш_{в.п}$	0,055	0,078	0,56÷0,76	0,30÷0,60	11,1
	$Ш_{п}$	0,063	0,083	0,48÷0,72	0,24÷0,56	8,3
	$О_{з.п}$	0,019	0,050	0,83÷0,93	0,60÷0,80	32,6
	$О_{в.п}$	0,017	0,052	0,88÷0,94	0,59÷0,79	42,4
	$О_{п.з}$	0,013	0,046	0,90÷0,96	0,63÷0,83	48,5

Згідно з даними табл. 6 довірчі інтервали коефіцієнтів кореляції усіх однойменних розмірів є значущими. Так довірчий інтервал зв'язку $\rho_{r_{y,x}}$ між довжиною стопи ($Д_{ст}$) та довжиною до середини 1-го пальця (у хлопчиків та дівчат від 0,92 до 0,95) наближується до функціональної залежності .

Для інших довжинних параметрів, а саме довжини до внутрішнього пучка та довжини до зовнішнього [8] пучка довірчі інтервали також і варіюють від 0,87 до 0,91 для першого параметра та від 0,82 до 0,91 для другого. Найбільша віддаленість від функціональної залежності спостерігається для залежності між довжиною стопи та довжиною до середини п'ятки при $0,51 < \rho_{r_{y,x}} < 0,73$ для хлопчиків, та для дівчаток $0,53 < \rho_{r_{y,x}} < 0,69$.

Крім того, додатково застосовувалися розрахунки показника суттєвості зв'язку a_r, який визначався за формулою:

$$a_r = \frac{r_{y,x}}{\sigma_{r_{y,x}}} \geq t_q \qquad (10)$$

Величина показника суттєвості зв'язків a_r (табл.6) має найменше значення для залежності між довжиною стопи та $Д_4$ – довжиною до середини п'ятки (a_r=13,5для хлопчиків й a_r=15,8 для дівчаток), а також для залежності між обхватом у пучках та $Ш_2$ – шириною п'ятки (a_r=11,3 для хлопчиків й a_r=14,2 для

дівчаток). Можна зробити висновок, що ці залежності менш суттєві або менш значущі. Це пояснюється тим, що точку найбільшої ширини у даній антропометричній частині на поверхні стопи не можливо чітко визначити.

Найбільш тісний кореляційний зв'язок спостерігається між однойменними розмірними ознаками такими, як довжина стопи та довжинні параметри – $Д_{0,9}$ (довжина до середини 1-го пальця), $Д_{0,73}$ (довжина до внутрішнього пучка), $Д_{0,62}$(довжина до зовнішнього пучка); обхват по середині пучків, та обхватними розмірами – $О_{вн.п}$(обхват по внутрішньому пучку), $О_{пятк.згин}$ (обхват через п'ятку та точку згину стопи), $О_{зовн.п}$ (обхват по зовнішньому пучку).

За статичними параметрами стоп досліджених нами хлопчиків та дівчаток були виведені рівняння регресії для однойменних довжинних та поперечних розмірів стоп (табл. 6).

Таблиця 6

Рівняння регресії, середні квадратичні відхилення та їх відносні похибки для однойменних розмірів стоп чоловіків та жінок

Розмірні ознаки стоп	Хлопчики			Дівчата		
	Рівняння регресії	Σ_y, мм	$\Delta\Sigma_y$, %	Рівняння регресії	Σ_y, мм	$\Delta\Sigma_y$, %
$Д_{0,9}$	$Д_{0,9}$=0,90Дст+5,81	6,6	2,9	$Д_{0,9}$=0,98Дст-13,15	6,9	3,2
$Д_{0,73}$	$Д_{0,73}$=0,76Дст-4,0	4,5	2,5	$Д_{0,73}$=0,76Дст-3,84	4,3	2,5
$Д_{0,62}$	$Д_{0,62}$=0,65Дст-0,66	5,9	3,8	$Д_{0,62}$=0,63Дст+1,48	5,6	3,8
$Д_{0,18}$	$Д_{0,18}$=0,32Дст-32,95	3,8	8,5	$Д_{0,18}$=0,25Дст-14,7	3,9	8,9
$Ш_{вн.п}$	$Ш_{вн.п}$=0,29Дст+17,76	7,7	9,5	$Ш_{вн.п}$=0,23Дст+37,88	4,7	5,9
$Ш_{пят}$	$Ш_{пят}$=0,27Дст-1,77	5,7	10,0	$Ш_{пят}$=0,32Дст-11,09	3,2	5,8
$О_{вн.п}$	$О_{вн.п}$=0,42Дст-79,97	0,96	3,9	$О_{вн.п}$=0,48Дст-89,19	1,33	9,5
$О_{зов.п}$	$О_{зов.п}$=0,60Дст-120,89	0,70	2,9	$О_{зов.п}$=0,52Дст-98,35	1,16	5,0
$О_{пят.згин}$	$О_{пят.згин}$=0,72Дст-141,02	0,75	2,3	$О_{пят.згин}$=0,40Дст-61,99	1,82	5,8

Перевірка лінійності рівнянь регресії наведених в табл. 6 показала, що гіпотеза лінійності зв’язків може бути відкинута.

Відносна похибка рівнянь регресії для однойменних розмірів у хлопчиків варіює від 2,5% до 3,8%, тобто знаходиться у допустимих межах. Але отримана величина похибки параметра $Д_4$ перевищує критичне допустиме значення похибки від 8,5 до 8,9% відповідно.

Абсолютні величини похибки рівнянь регресії для різних параметрів у хлопчиків коливаються від 0,7 мм до 7,7 мм, а у дівчат від 1,16 до 4,7 мм, що є дуже суттєвим для проектування колодок та взуття, тому ми відхиляємо запропоновану гіпотезу про функціональний зв'язок між однойменними параметрами стоп хлопчиків та дівчаток і для подальших розрахунків та проектування колодок та взуття для даних груп населення пропонуємо використовувати пропорційну залежність між вказаними параметрами (табл. 7).

Таблиця 7

Характерні анатомічні точки стоп дітей-школярів по довжині стопи

Характерні анатомічні точки стоп	Коефіцієнти по $Д_{стопи}$											
	Хлопчики						Дівчата					
	По контуру			По відбитку			По контуру			По відбитку		
	Україна,2014 р.	відхилення		Україна, 2014 р.	відхилення		Україна, 2014р.	відхилення		Україна, 2014 р.	відхилення	
		абс., мм	%		абс., мм	%		абс., мм	%		абс., мм	%
Найширше місце п’ятки	0,18	-	-	0,17	-0,4	1,0	0,18	0,18	-	0,17	-0,4	1,0
Точки: центру зовнішньої щиколотки	0,202	0,204	0,48	0,2	0,201	-0,24	0,1	0,201	-0,23	0,1	0,199	-0,7
згину стопи	0,292	0,292	-	-	0,284	-0,5	0,7	0,288	-0,3	0,4	0,277	-1,0
зовнішнього пучка	0,64	0,647	1,1	0,7	0,63	-1,4	0,9	0,63	-1,4	1,0	0,63	-1,4
середини пучків	0,382	0,385	0,3	0,3	0,373	-0,8	0,9	0,382	-	-	0,371	-0,9
внутрішнього пучка	0,742	0,743	0,2	0,1	0,736	-1,1	0,6	0,740	-0,4	0,2	0,735	-1,3
кінця відбитка п’ятого пальця	0,82	0,82	-	-	0,81	-	-	0,82	-	-	0,81	-1,4
центру відбитка першого пальця	0,922	0,923	0,5	0,2	0,919	-0,4	0,2	0,919	-0,6	0,3	0,915	-1,4

Тобто з необхідною вірогідністю можна сказати, що між однойменними параметрами стоп

хлопчиків та дівчаток існує пропорційна залежність.

Висновки

1. Перевірка гіпотези про нормальне розподілення розмірних ознак стоп чоловіків та жінок дала змогу зробити такі висновки, що розподілення частот довжинних, висотних та поперечних розмірів стоп школярів (широтних та обхватних) з достатньою імовірністю виражається законом нормального розподілення.

2. Перевірка другої закономірності виявила, що середні обхватні та широтні розміри стоп даної вікової групи пов'язані з їх довжиною ортогональною регресійною залежністю, яка у нашому випадку має вигляд:

$$y = \text{tg}\ \alpha \cdot x + b.$$

1. Перевірка третьої та четвертої закономірностей показала, що у школярів всі однойменні розміри стоп: довжинні – з довжиною стопи, поперечні – з обхватом у пучках, – мають між собою тісну пропорційну залежність.

2. Таким чином були отримані аналітичні залежності для проектування колодок та взуття для дітей-школярів.

Література

1. Кернеш В.П. Удосконалення гармонійності внутрішньої форми і конструкцій юнацького і дівочого взуття : дис. … канд. техн. наук : 05.19.06 / Кернеш Вікторія Пилипівна. – К., 2007. – 153 с.

2. Надопта Т.А. Розмірні характеристики стопи / Т.А. Надопта // ВІСНИК ХНУ. – 2008. – № 1. – С. 102–106.

3. Цалюк О.В. Установление конструктивных рациональных параметров колодки и обуви для детей : дис. … канд. техн. наук : 05.19.06 / Цалюк О.В. – К., 1984. – 136 с.

4. Кочеткова Т.С. Антропологические и биомеханические основы конструирования изделий из кожи / Т.С. Кочеткова, В.М. Ключникова. – М. : Легпромбытиздат, 1991. – 192 с.

5. Петухов С.В. Биомеханика, бионика и симметрия / С.В. Петухов. – М. : Наука, 1981. – 240 с.

6. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский – М. : Высш. шк.,1988. – 239 с.

7. Венецкий И.Г. Пособие по математической статистике / И.Г. Венецкий, Г.С. Кильдышева. – М. : Гос. статистич. издательство, 1956. – 245 с.

8. Корн Г. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.

Рецензія/Peer review : 4.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.

УДК 677.024.001

О.В. ФЕДОРЧЕНКО, О.В. ЗАКОРА
Херсонський національний технічний університет

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ І ЧЕРГУВАННЯ ОСНОВНИХ І УТОКОВИХ ПЕРЕКРИТТІВ НА ЕЛЕМЕНТИ ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ ТКАНИН

Експериментально отримані значення фактичної фази побудови тканин комбінованих переплетень за мікрозрізами вздовж основних та утокових ниток в межах рапорту переплетення. В результаті встановлено, що відношення висот хвиль ниток в елементі внутрішньої будови тканини, які визначені в місцях пересічок для кожної нитки основи і утоку в рапорті, залежать від довжини і чергування основних і утокових перекриттів.

Ключові слова: комбіновані переплетення, основні та утокові перекриття, пересічки ниток.

O.V. FEDORCHENKO, O.V. ZAKORA
Kherson National Technical University, Ukraine

ANALYSIS OF INFLUENCE LONG AND ALTERNATION WARP AND WEFT OVERLAYS ON ELEMENTS OF INSIDE FABRIC STRUCTURE

The character of the relative position of the warp and weft within the report weaves fabrics combined. For this microcuts made along the warp and weft threads, which defined the actual order of the phase structure (OFS) tissues for each thread in a report. As an option taken OFS wave height of warp and weft. As a result, found that the ratio of wave height threads in the fabric of the internal structure element defined in crossing places for each warp and weft in a report, depending on the length and the alternation of warp and weft beams that make up this crossing. With increasing length of threads overlap increases bending wave height of warp and weft and therefore increases the coefficient by which the accepted phase structure of the fabric. But with increasing length wef overlap phase structure in order crossing reduced. Average phase structure has to overlap with alternating strands 1/1, as in the case of bending wave height about equal to the diameter filaments yarns

Keywords: combined weave, warp and weft overlap, crossing threads.

Вступ

Однією з вимог, що висувають споживачі до тканин, є оригінальний зовнішній вигляд, обумовлений неповторним рельєфом. Дані вимоги можна задовольнити розширенням асортименту одношарових тканин, виготовлених комбінованими переплетеннями. Цей клас переплетень складає поширену класифікаційну групу тканин, що будуються за різними принципами і правилами. Широкий асортимент продукції, яку можна виготовити з цих тканин, майже повністю охоплює усі види текстильних виробів одягового призначення – це і костюмно-сукняна група, і дитячі тканини, і тканини для пошиття верхнього одягу та інші. Проте процес проектування і прогнозування якості виробів ускладнюється неоднорідністю структури цих тканин. Чергування основних та утокових перекриттів у межах рапорту має різноманітний характер, в більшості підкласів комбінованих переплетень повторюваність елементів рапорту зводиться до мінімуму. Така будова спонукає до більш детального вивчення взаємозв'язку елементів рапорту переплетення та їх впливу на структуру тканин [1]. Тому дослідження особливостей будови тканин, виготовлених комбінованими переплетеннями, є актуальною задачею сучасної науки про будову і проектування тканин.

Експериментальна частина

При проектуванні тканин десинатору необхідно представляти їх внутрішню будову, взаємний вигин ниток основи і утоку, що визначає зовнішній вигляд, опорну поверхню і властивості майбутньої тканини. Проведені дослідження та вивчення поперечних розрізів тканин дозволили установити, що форма та розмір основних і утокових перекриттів суттєво впливають на рельєф лицьової поверхні та порядок фазової будови тканин [2]. При цьому також встановлено, що реальна форма взаємного розташування ниток в тканині різко відрізняється від запропонованих моделей її зображення [3]. Особливо це стосується тканин комбінованих переплетень, рапорт яких складається з чергувань основних і утокових перекриттів різної форми і розміру.

Тому метою даної роботи є дослідження характеру взаємного розташування ниток основи і утоку в межах рапорту тканин комбінованих переплетень та визначення фази будови тканин по кожній нитці рапорту.

Досліджувані тканини виготовлені з бавовняної крученої пряжі лінійної щільності по основі 34х2 текс, по утоку 29х2 текс, щільність тканини по основі – 158 нит/дм, по утоку – 200 нит/дм. Зі зразків тканин виготовлялись мікророзрізи вздовж ниток основи і утоку [4]. Порядок фазової будови (ПФБ) визначався по кожній пересічці для кожної нитки рапорту, що є відмінністю даного методу в порівнянні з іншими, в яких визначення ПФБ тканини здійснювалось по будь-яких нитках рапорту переплетення. Рапорти тканин комбінованих переплетень та схематичні розрізи по кожній нитці рапорту наведені на рис. 1 – 3.

Проаналізуємо переплетення тканини 1.

За розрізами тканини можна побачити, що всі нитки в межах рапорту мають різну кількість пересічок. Розрізи ниток вздовж основи під номером 1, 5, 8, 12 мають 5 пересічок, а розрізи ниток під номером 3, 4, 6, 9, 10 мають по 3 пересічки, а 2-а і 11-а мають по 7 пересічок. Аналогічно можна проаналізувати і розрізи вздовж утокових ниток.

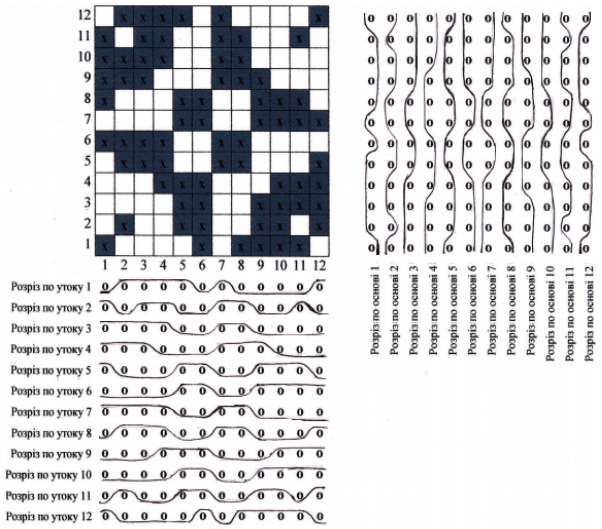


Рис. 1. Переплетення тканини 1 П

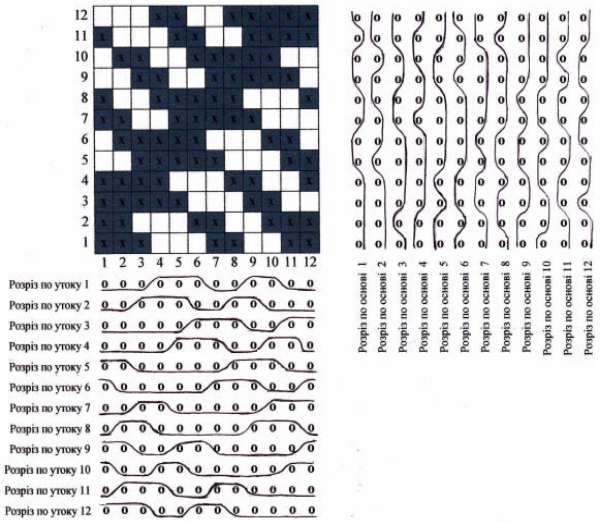


Рис. 2. Переплетення тканини 2Ц

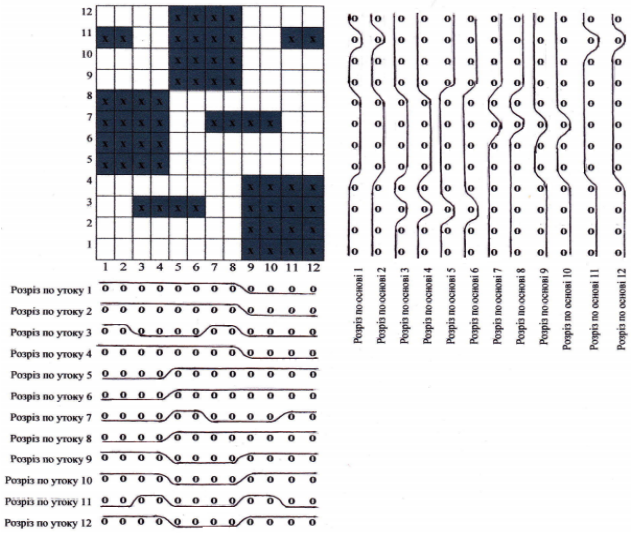
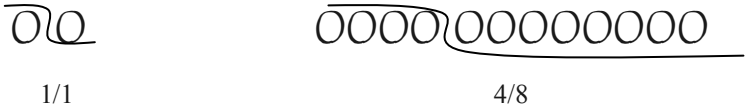


Рис. 3. Переплетення тканини 3Б

Тканина 1 має різну довжину основних і утокових перекриттів в межах рапорту. Наприклад, перекриття: 1/1 присутнє в нитках 1, 2, 5, 8, 11 та 12 по основі та утоку; 1/2 – в нитках 2 та 11 по основі та утоку; 1/3 – в нитках 1, 2, 11 та 12 обох систем; 1/4 – в нитках 1 та 12; 2/2 – в нитках 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11 по основі та утоку; 2/3 – в нитках 5 та 8 обох систем; 2/4 – в нитках 3, 6, 7, 10 по основі та утоку; 3/3 – в нитках 4 та 5 по основі та утоку. Тобто в одній нитці можуть бути перекриття з найменшою і найбільшою довжиною. Наприклад, в першій нитці по основі та утоку першу і четверту пересічку складають перекриття довжиною 1 і 4 (1/4); другу і п'яту пересічку складають перекриття 4/1; третю пересічку – 1/1. Характер чергування перекриттів для інших ниток рапорту переплетення тканини 1 можна проаналізувати за рис. 1, де проілюстровані всі розрізи по основі та утоку даної тканини. Аналогічна картина спостерігається для інших зразків тканин, представлених на рис. 2 і рис. 3.

Таким чином в рапортах переплетень тканин, що розглядаються, представлені різні комбінації основних і утокових перекриттів, які мають різну довжину: від 1/1 до 4/8 (рис. 4).



1/1 4/8

Рис. 4. Види перекриттів ниток

За мікророзрізами тканин розраховувався порядок фазової будови по кожній пересічці за методикою [4]. Результати розрахунку порядку фазової будови на прикладі переплетення тканини 1 представлені у табл. 1 та табл. 2.

Таблиця 1

Розрахунок фази будови тканини по основі

Тканина 1					
	1 утокова нитка				
Параметри	1 пересічка	2 пересічка	3 пересічка	4 пересічка	5 пересічка
Висота хвилі вигину ($h_{o)}$	0,27	0,31	0,31	0,27	0,15
Діаметр верхньої нитки основи (d_{o1})	0,30	0,32	0,28	0,28	0,26
Діаметр нижньої нитки основи (d_{o2})	0,32	0,28	0,28	0,26	0,28
Середній діаметр ниток (d_{cp})	0,31	0,30	0,28	0,27	0,27
Коеф. хвилі вигину по основі (K_{ho})	0,871	1,033	1,107	1,000	0,556
Порядок фазової будови (Ф=4Kho+1)	4,48	5,13	5,43	5,00	3,22

Таблиця 2

Розрахунок фази будови тканини по утоку

Тканина 1					
1 основна нитка					
Параметри	1 пересічка	2 пересічка	3 пересічка	4 пересічка	5 пересічка
Висота хвилі вигину (hy)	0,28	0,21	0,37	0,26	0,12
Діаметр верхньої нитки утоку (dy_1)	0,26	0,28	0,22	0,24	0,28
Діаметр нижньої нитки основи (dy_2)	0,26	0,22	0,24	0,26	0,28
Середній діаметр ниток (d_{cp})	0,26	0,25	0,23	0,25	0,28
Коеф. хвилі вигину по утоку (Khy)	1,077	0,840	1,609	1,040	0,429
Порядок фазової будови (Ф=9-4Khy)	4,69	5,64	2,57	4,84	7,29

Аналіз зроблених вимірів і розрахунків дозволяє зробити наступні висновки: спостерігається значна розбіжність числових значень коефіцієнту висоти хвилі вигину по кожній з пересічок, що у наслідку призвело до різних значень порядку фазової побудови по кожній нитці рапорту. Така тенденція спостерігається і для інших тканин. Результати дослідження представлені в табл. 3 і табл. 4 на прикладі переплетення тканини 2.

Таблиця 3

Результати визначення ПФБ по основі у рапорті переплетення тканини 2

Вид перекриття	ООООО ООО		ООО ОО		ОО ОО		ОО ООООО	
Номер нитки	Висота хвилі вигину	Фаза	Висота хвилі вигину	Фаза	Висота хвилі вигину	Фаза	Висота хвилі вигину	Фаза
h_{o1}	0,29	5,00	0,27	4,18	-	-	0,30	4,43
h_{o2}	0,25	4,33	0,34	5,12	0,25	4,03	0,34	5,53
h_{o3}	0,21	3,55	-	-	0,22	3,84	-	-
h_{o4}	0,33	5,55	0,30	5,00	0,16	3,29	0,27	4,72
h_{o5}	0,24	4,20	0,39	5,59	-	-	0,29	4,05
h_{o6}	0,21	3,00	0,25	3,94	0,25	3,86	0,36	5,00
h_{o7}	-	-	-	-	0,32	5,57	0,34	6,04
h_{o8}	0,34	5,25	0,42	5,67	0,23	3,36	0,33	4,47
h_{o9}	0,23	3,63	0,30	4,33	0,26	4,35	-	-
h_{o10}	0,37	5,11	0,42	5,80	0,26	3,81	0,37	4,79
h_{o11}	0,31	4,76	0,36	5,24	0,22	3,67	0,29	4,63
h_{o12}	-	-	-	-	0,20	3,50	0,21	3,27
Середнє значення	0,278	4,438	0,339	4,986	0,237	3,982	0,31	4,693

За результатами, представленими в таблицях, можна зробити наступні висновки. Для пересічок, які складаються з комбінації перекриттів 2/1, висота хвилі вигину ниток має мінімальне значення. Максимальне значення висоти хвилі вигину ниток мають пересічки, які складаються з довгих перекриттів (5/3, 2/5). Тобто збільшення величини довжини перекриття веде до збільшення висоти вигину ниток, що викликає збільшення коефіцієнтів Kh_o та Kh_y. Але при цьому спостерігається характерний взаємозв'язок між порядками фази будови тканини, розрахованими стосовно основної і утокової систем ниток. При збільшенні довжини перекриття і відповідно коефіцієнту Kh_o порядок фазової будови для даної пересічки збільшується. Проте зі збільшенням кількості основних ниток під утоковим перекриттям (тобто при збільшенні Kh_y) порядок фазової будови у пресічці зменшується. Середнє значення фази будови одержані для перекриття з чергуванням ниток 1/1, так як в цьому випадку $K_{ho}= K_{hy}=1$ і висота хвилі вигину при цьому складає 0,305 мм, що приблизно дорівнює діаметру нитки.

Таблиця 4

Результати визначення ПФБ по утоку у рапорті переплетення тканини 2

Вид перекриття	ООООО|ОО		ОООО|О		ОО|ОО		ОО|О		О|О	
Номер нитки	Висота хвилі вигину	Фаза	Висота хвилі вигину	Фаза	Висота хвилі вигину	Фаза	Висота хвилі вигину	Фаза	Висота хвилі вигину	Фаза
h_{y1}	0,33	5,12	-	-	0,31 0,21	5,35 6,45	0,26	5,53	0,37	4,23
h_{y2}	-	-	0,31	5,24	0,20	6,33	0,25 0,22 0,25	5,97 6,07 5,67	-	-
h_{y3}	0,34	4,31	0,40	3,67	0,23 0,23	6,29 6,21	-	-	0,34	4,88
h_{y4}	-	-	0,34	3,96	0,22	5,74	0,24 0,24	5,69 5,80	-	-
h_{y5}	0,36	4,76	0,47	3,47	0,29	5,59	-	-	-	-
h_{y6}	0,36	3,86	0,32	4,26	0,29	4,86	0,33 0,32 0,32	4,74 4,87 4,73	-	-
h_{y7}	0,30	4,86	0,44	3,13	0,26	5,65	0,23	5,71	0,33	4,60
h_{y8}	0,42	3,91	0,44	3,82	0,36	4,64	0,34 0,36 0,30	5,32 4,89 5,36	-	-
h_{y9}	-	-	0,34	5,00	0,34 0,32	4,61 4,87	0,35	4,88	0,28	5,50
h_{y10}	0,41	3,88	-	-	0,29	5,69	0,33 0,32	5,00 4,87	-	-
h_{y11}	-	-	0,38	4,10	0,33 0,15	4,88 7,00	0,31 0,38	4,72 4,10	0,28	5,39
h_{y12}	0,35	4,63	-	-	0,17	6,81	0,30 0,24 0,28	4,71 5,90 5,14	-	-
Середнє значення	0,359	4,416	0,382	4,072	0,263	5,686	0,294	5,222	0,32	4,92

Таким чином відношення висоти хвиль ниток в елементі тканини залежить не тільки від відношення діаметрів утоку і основи, геометричної щільності ниток в тканині, жорсткості ниток на розтягнення, натягу ниток основи на верстаті, але й від виду переплетення, тобто від комбінації і довжини основних і утокових перекриттів в межах рапорту.

Висновки

1. При досліджені структури тканин комбінованих переплетень виявлено, що порядок фазової будови, який визначається для кожної нитки рапорту по основі і по утоку, має різні значення, що обумовлене різною комбінацією довжини основних і утокових перекриттів в межах рапорту.

2. Значення висоти хвилі вигину ниток, які розраховувались в кожній пересічці, прямо пропорційно залежить від довжини перекриттів ниток основи і утоку в рапорті переплетення: чим більше довжина перекриття, тим більше значення висоти хвилі вигину ниток.

3. Дослідження фази будови тканин комбінованих переплетень необхідно проводити з врахуванням кількості пересічок у рапорті переплетення, довжини перекриттів та чергування даних перекриттів в одній нитці рапорту.

Література

1. Николаев С.Д. Влияние вида переплетения на параметры строения тканей / С.Д. Николаев, Н.А. Михаева, О.В. Парфенов// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 2. – С. 59.

2. Толубеева Г.И. Развитие методологии проектирования однослойных тканых полотен с визуальными объемными эффектами : автореф. дис. на соиск. учен. степ. док. техн. наук : спец. 05.19.02 / Толубеева Галина Ивановна. – Иваново, 2013. – 40 с.

3. Степанов О.С. Некоторые геометрические соотношения теории строения ткани / О.С. Степанов, В.Н. Грачев // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. – № 3. – С. 45.

4. Дробот О.В. Аналіз залежності фази будови тканин від виду переплетення / О.В. Дробот, О.В. Закора // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – 2012. – № 1(19). – С. 80 – 84.

Рецензія/Peer review : 4.12.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., професор, Сарібєкова Д.Г.

РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 510.6

Л.П. БЕДРАТЮК, Г.І. БЕДРАТЮК
Хмельницький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОЇ АЛГЕБРИ MAPLE В КЛАСИЧНИХ КРИПТОСИСТЕМАХ

Представлено опис основних команд системи комп'ютерної алгебри Maple. Розглянуто реалізацію деяких класичних криптосистем засобами системи комп'ютерної алгебри Maple. Зокрема розглянуті процедури для криптосистеми Цезаря, афінної криптосистеми, криптосистеми Віженера та криптосистеми Хілла. Надано описи криптосистем і детальні пояснення до кожної з наведених процедур. Розглянуті пакети пропонується використовувати в ході вивчення дисциплін: дискретна математика, засоби захисту інформації, теорія кодування та криптографія.

Ключові слова: криптосистема, відкритий текст, шифротекст, ключ, функція шифрування, функція дешифрування, Maple, шифр Цезаря, афінний шифр, шифр Віженера, шифр Хілла.

L.P. BEDRATIUK, A.I. BEDRATIUK
Khmelnytskyi National University, Ukraine

USING OF THE COMPUTER ALGEBRA SYSTEM MAPLE FOR CLASSICAL CRYPTOSYSTEMS

We describe the basic commands computer algebra system Maple. Realization of some classical cryptosystems via the computer algebra system Maple. Specifically are considered. The procedures for he following classical cryptosystems are considered: the Caesar Cipher the affine cryptosystem, the Vigenere cryptosystem and the Hill cryptosystem. The detailed explanation of every cryptosystems and used procedures are given. The article can be useful in the study of some sections of discrete mathematics, data protection, coding theory and cryptography.

Keywords: cryptosystem, plaintext, ciphertext, key, encryption rule, decryption rule, Maple, Caesar cipher, afinne cipher Vigenere cipher, Hill's cipher.

Постановка проблеми. Останнім часом спостерігається активне проникнення систем комп'ютерної алгебри в освітній процес, що дозволяє формувати інноваційні технології навчання, зокрема математичного навчання в університетах [1–4]. Однією з найбільш популярних систем комп'ютерної алгебри є система Maple, фірми Waterloo Maple, Inc., яка успішно поєднує символьні маніпуляції, обчислювальну математику, потужну графіку та зручну мову програмування. В силу своєї зручності та універсальності система Maple стала незамінним інструментом наукових досліджень для студентів, інженерів та дослідників. Майже для кожного розділу сучасної математики в Maple розроблені окремі спеціалізовані пакети. Проте на даний час ці технології, незважаючи на свою ефективність та наочність, в силу різних причин, ще недостатньо поширені в навчальному процесі, що не сприяє інтеграції системи вищої освіти України у світовий простір вищої освіти. У статті описуються можливі варіанти реалізації класичних криптосистем в середовищі Maple. Розглянуто класичні криптосистеми: Цезаря, афінна криптосистема, криптосистема Віженера та криптосистема Хілла. Для цих систем написані процедури шифрування та дешифрування. Початкові навики роботи в системі комп'ютерної алгебри Maple, детально розглянуто в [5, 6], а основні поняття криптографії розглянуто в [7].

Матеріали статті можуть бути використані студентами та викладачами ВНЗ для розв'язання типових задач, які зустрічаються в процесі вивчення дисциплін "Захист інформації", "Дискретні структури", "Безпека програм та даних", "Теорія кодування та криптографія".

2. Аналіз джерел літературних даних або публікацій та постановка проблеми

Метою даної статті є реалізація в середовищі Maple основних типів класичних криптосистем. Початкові навики роботи в системі комп'ютерної алгебри Maple, детально розглянуто в [5, 6].

Криптографія це наука яка займається розробкою та вивченням методів конфіденційної та автентичної передачі інформації. Під відкритим текстом розуміються будь які данні призначені для передачі. Відкритий текст завжди можна подати у вигляді послідовності цілих чисел, причому цього можна досягнути багатьма способами, наприклад замінивши текстові символи їхніми ASCII-кодами. Під шифротекстом розуміється результат застосування до відкритого тексту деякого алгоритму шифрування, який залежить від додаткової інформації яка називається ключем. Для задавання криптосистеми потрібно задати алгоритми шифрування та дешифрування, а також задати ключі шифрування та дешифрування. Якщо ключі шифрування та дешифрування співпадають, то такі системи шифрування називаються симетричними.

Більш загально, криптосистемою називається п'ятірка (P,C,K,E,D), де P – множина відкритих текстів, C – множина шифротектів, K – множина ключів, E_k: $P \to C$ – функція шифрування і D_k: $C \to P$ – функція дешифрування, причому $D_k(E_k(x))=x$ для всіх відкритих текстів x і для всіх ключів k. Атака на криптоситему полягає в діях спрямованих на отримання ключа k, що дасть можливість дешифрувати будь-

який шифротекст. Яка саме система шифрування використовується вважається відомою, в силу принципу Керкгоффса. Дана стаття є продовженням статей авторів [8–10], спрямованих на популяризацію систем комп'ютерної алгебри.

Виклад основного матеріалу. Дамо короткий опис тієї частини мови програмування системи Maple та стандартних процедур, які необхідні для вирішення типових задач оптимізації.

Криптосистема Цезаря. Найпростішою і найдавнішою криптосистемою є шифр зсуву, або шифр Цезаря. Для цієї криптосистеми $P=C$, тобто множини шифротекстів і відкритих текстів співпадають і рівні таблиці символів ASCII. Простір ключів K є множиною натуральних чисел від 0 до 255. Функції шифрування і дешифрування визначаються такими формулами

$$E_k(x)=(x+k) \bmod 255,$$
$$D_k(x)=(x-k) \bmod 255.$$

Тут x є ASCII кодом відповідного символу.

Припустимо, нам потрібно зашифрувати шифром Цезаря текст "Приступайте до виконання місії завтра о 16:20". Спочатку визначаємо відповідну змінну в Maple:

```
> T:="Приступайте до виконання місії завтра о 16:20":
```

Команда Maple **convert**(S, bytes) перетворює рядок символів *S* в рядок із їхніх ASCII-кодів.

Формуємо список кодів *P,* який відповідає повідомленню *T*.

```
>P:=convert(T,bytes);
 T[1]=[207, 240, 232, 241, 242, 243, 239, 224, 233, 242, 229, 32, 228, 238,
32, 226, 232, 234, 238, 237, 224, 237, 237, 255, 32, 236,179, 241, 179, 191,
32, 231, 224, 226, 242, 240, 224, 32, 111,32, 49, 54, 58, 50, 48]
```

Повторне застосування цієї команди відновлює початковий текст:

```
>convert(P,bytes);
"Приступайте до виконання місії завтра о 16:20"
```

В оригінальному шифрі Цезаря зсув k був рівним 3.

Розглянемо процедуру шифрування **caesar**(x,k), яка зсовує число x на k позицій праворуч за модулем 255:

```
>caesar := proc(x, key) ((x + key - 1) mod 255) + 1 end;
```

Застосувавши цю команду до кожного символу відкритого тексту *P,* отримаємо шифротекст

```
> C:=convert(map(caesar,P,3),bytes);
C := " Тулфхцтгмхи#зс#елнсргрр#п¶ф¶В#кгехуг#r#49=53"
```

Тепер ми можемо написати процедуру **encode_caesar(message, key)** для перетворення відкритого тексту у шифротекст при наперед заданому ключі:

```
> encode_caesar := proc(plaintext, key)
 local t:
#перетворюємо повідомлення у набір цілих чисел
 t[1] := convert(plaintext, bytes):
#зсовуємо на розмір ключа
 t[2] := map(caesar, t [1], key):
#повертаємося назад у символьний вигляд
 convert(t [2], bytes);
 end proc:
```

Для декодування повідомлення використовуємо процедуру **decode_caesar(message, key)**

```
> decode_caesar := proc(ciphertext, key)
 local t:
#перетворюємо повідомлення у набір цілих чисел
 t [1] := convert(ciphertext, bytes):
#зсовуємо на розмір ключа
 t [2] := map(caesar, t[1], -key):
#повертаємося назад у символьний вигляд
```

```
 convert(t[2], bytes);
 end proc:
```

Шифр Цезаря має лише 256 можливих ключів, тому його можна легко зламати простим перебором.

Для атаки на криптосистему методом грубої сили і підбору ключа при відомому шифротексті використаємо процедуру:

```
> breakcaesar:= proc(ciphertext) local t, key;
 for key from 1 to 255 do
 t := encode_caesar(ciphertext, - key):
 print(`Ключ `||key,` повертає - `,t);
 end do;
 end proc:
```

Афінна криптосистема. Афінна криптосистема визначається такими параметрами $P=C=K=Z_{26}^{m}$. Для ключа $K=[k_1,k_2]$, де числа a і 255 взаємно прості, (a,255)=1, функції шифрування та дешифрування мають вигляд

$$E_k(x)=(k_1 x+k_2) \bmod 255,$$
$$D_k(x) =(x-k_2)\, k_1^{-1} \bmod 255$$

Для попередньої перевірки взаємної простоти k_1 і 255, тобто того чи їх найбільший спільний дільник чисел a і 255 використовуємо процедуру *gcd(a,b),* яка знаходить найбільший спільний дільник чисел a і b.

Процедура яка виконує шифрування має вигляд

```
>encode_Aff := proc(plaintext, key)
 local t,Aff:
#перевірка допустимості ключа
> if gcd(key[1],255)<>1 then print("змініть ключ"):break end if:
 #процедура для шифрування одного коду символу
 Aff:=proc(x, key) ((key[1]*x + key[2] - 1) mod 255) + 1 end proc;
#перетворюємо повідомлення у набір цілих чисел:
 t[1] := convert(plaintext, bytes):
#перетворюємо список кодів символів
 t[2] := map(Aff, t[1], key):
#повертаємося назад у символьний вигляд
 convert(t[2], bytes);
 end proc:
```

Приклад шифрування цієї процедурою відкритого тексту T з ключем K=[7,100]:

```
> encode_Aff(T,[7,100]);
                "□ъВ□□□уЉЙ□-Е¦мЕ□ВРмеЉeedЕЮN□NўЕ»Љ□□ъЉЕрЕjЯыГµ"
```

Для дешифрування повідомлення потрібно знаходити мультиплікативно обернений елемент кільця Z_{255}. Для цього використаємо команду `msolve(система рівнянь, модуль)`, яка розв'язує рівняння і системи рівнянь за модулем цілого числа. Відповідна процедура `inv_Aff` має вигляд

```
>   inv_Aff:=proc(x,key)local    a,y:a:=subs(msolve(key[1]*y=1,255),y):    (x-
key[2])*a mod 255 end proc:
```

Процедура для дешифрування має вигляд

```
> decode_Aff := proc(ciphertext, key)
 local t, Aff:
#перевірка допустимості ключа
> if gcd(key[1],255)<>1 then print("змініть ключ"):break end if:
inv_Aff:=proc(x,key)local  a,y:a:=subs(msolve(key[1]*y=1,255),y):  (x-key[2])*a
mod 255 end proc:
#перетворюємо повідомлення у набір цілих чисел
 t[1] := convert(ciphertext, bytes):
#зсовуємо на розмір ключа
```

```
 t[2] := map(inv_Aff, t[1], key):
#повертаємося назад у символьний вигляд
 convert(t[2], bytes);
 end proc:
```

Ця реалізація афінної криптосистеми має всього φ(255) ?255 =32640 ключів, де φ – функція Ейлера, тому вона також може бути легко зламана перебором ключів.

```
breakaffin:= proc(ciphertext) local t, key, key1,key2;
 for key1 from 1 to 255 do
 for key2 from 1 to 255 do
 key:=[key1,key2]:
 if gcd(key1,255)=1 then t := encode_Aff(ciphertext, key):
 print(`Ключ `||key,` повертає - `,t);
 end do;
 end proc:
```

Криптосистема Віженера. Криптосистема Віженера узагальнює криптосистему Цезаря тим що розбиває відкритий текст на блоки довжини m і до кожного символу блоку застосовується шифр Цезаря із своїм ключем. Формально криптосистема Віженера визначається параметрами $P=C=K=Z_{26}^m$. Для ключа $K=(k_1,k_2,\ldots,k_m)$, функції шифрування та дешифрування мають вигляд

$$E_k(x_1,x_2,\ldots,x_m)=(x_1+k_1,\ldots,x_m+k_m) \bmod 26$$
$$D_k(x_1,x_2,\ldots,x_m)=(x_1-k_1,\ldots,x_m-k_m) \bmod 26$$

Отже, криптосистема Віженера довжини m є прямим добутком m криптосистем Цезаря.

Для шифрування відкритого тексту чисел використовуємо процедуру

```
> encode_vigener := proc(message, key)
 local T:
#перетворюємо повідомлення у набір цілих чисел
 T[1] := convert(message, bytes):
#перетворюємо ключ у набір цілих чисел
 T[2] := convert(key, bytes):
#зсовуємо на розмір ключа
 T[3] := T[1]+T[2] mod 255:
#повертаємося назад у символьний вигляд
 convert(T[3], bytes);
 end;
```

Для дешифрування тексту використовуємо процедуру

```
>encode_vigener := proc(message, key)
 local T:
#перетворюємо повідомлення у набір цілих чисел
 T[1] := convert(message, bytes):
#перетворюємо ключ у набір цілих чисел
 T[2] := convert(key, bytes):
#зсовуємо на розмір ключа
 T[3] := T[1]-T[2] mod 255:
#повертаємося назад у символьний вигляд
 convert(T[3], bytes);
 end;
```

Криптосистема Хілла. Криптосистема Хілла узагальнює всі наведені раніше криптосистеми. Основна ідея криптосистеми полягає і тому що текст розбивається на блоки, як у криптосистемі Віженера, ключем є невироджена в кільці Z_{255} цілочисельна матриця, а процедури шифрування та дешифрування зводяться до операцій множення векторів на ключ на та обернену матрицю до ключа. Формально криптосистема Хілла задається такими параметрами: $P=C=K=Z_{127}^m$. Множина ключів співпадає із групою $GL(m, Z_{127})$ всіх невироджених квадратних матриць порядку m. Функції шифруванняі дешифрування для ключа(матриці) K і блоку тексту $(x_1,x_2,\ldots,x_m)$мають вигляд

$$E_K(x_1,x_2,\ldots,x_m)=(x_1,x_2,\ldots,x_m)K \bmod 127,$$
$$D_K(x_1,x_2,\ldots,x_m)=(x_1,x_2,\ldots,x_m)\,K^{-1} \bmod 127.$$

В Maple пакет Linear Algebra містить підпакет Modular для проведення обчислень у скінченних кільцях, який викликається командою

```
> with(LinearAlgebra[Modular]):
```

Ключ K формується рандомно процедурою

```
>Key:=m->Mod(127,Matrix(m,m,(i,j)->rand()),integer[]);
```

Наприклад

```
> K:=Key(3):
```

$$K := \begin{bmatrix} 60 & 64 & 126 \\ 6 & 26 & 39 \\ 54 & 110 & 116 \end{bmatrix}$$

Невирожденість ключа перевіряємо знаходячи його визначник

```
> Determinant(127,K);
```
66

Тепер знаходимо обернений ключ $M=K^{-1}$ відповідною командою пакету:

```
> M := Inverse(127,K);
```
$$M := \begin{bmatrix} 100 & 9 & 69 \\ 56 & 37 & 103 \\ 58 & 114 & 64 \end{bmatrix}$$

Для прикладу, перетворюємо повідомлення "abg" у вектор кодів:

```
> T:=map(x->x mod 127,convert("abg",bytes));
```

Для шифрування використаємо команду множення `multiply` з паркету `linalg`:

```
> with(linalg):C:=map(x->x mod 127,multiply(T,K));
```
$C := [32, 20, 52]$

Для дешифрування шифротексту C виконаємо множення на обернену матрицю M

```
 >map(x->x mod 127,multiply(C,M));
```
[97 , 98 , 103]

Переводимо отриманий рядок кодів у текст

```
> convert([97,98,103],bytes);
```
"abg"

Загальна процедура яка генерує пару ключ-обернений ключ має вигляд

```
> key_create:=proc(m) local K,M,Key:
 Key:=m->Mod(127,Matrix(m,m,(i,j)->rand()),integer[]):
K:=Key(3):
 if Determinant(127,K0 then print("спробуйте згенерувати ключ ще раз"):
break: end if:
 M := Inverse(127,K): return([K,M])
 end proc;
```

Наприклад

```
> Key:=key_create(3);
```
$$Key := \left[\begin{bmatrix} 74 & 33 & 58 \\ 6 & 103 & 30 \\ 81 & 123 & 65 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 90 & 93 & 121 \\ 63 & 120 & 117 \\ 7 & 124 & 44 \end{bmatrix} \right]$$

Процедура шифрування відкритого тексту:

```
> endcode_Hill_1block:=proc(ciphretext) local T,C:
T:=map(x->x mod 127,convert(ciphretext,bytes)):
C:=convert(map(x->x mod 127,multiply(T,Key[1])),list):
 end proc;
```

Процедура дешифрування шифротексту

```
> decode_Hill_1block:=proc(ciphretext) local T,TT:
T:=map(x->x mod 127,multiply(ciphretext,Key[2])):
TT:=convert(T,bytes):TT
 end proc;
```

Для шифрування та дешифрування повідомлення перед застосуванням цих процедур повідомлення потрібно розбивати на блоки фіксованої довжини.

Висновки. В статті запропонована методика вивчення основ криптографії з використанням відомої системи комп'ютерної алгебри Maple. Такі підходи, на думку авторів, сприятимуть активізації навчально-пізнавальної діяльності студентів та підвищать ефективність організації їхньої самостійної роботи. Крім того вони внесуть новизну в традиційні методи навчання, які зараз характеризуються пасивністю та епізодичним безсистемним використанням інформаційних технологій. В статті дано варіант застосування основних команд пакетів `LinearAlgebra[Modular]` та `linalg` системи комп'ютерної алгебри Maple для ілюстрації роботи класичних криптосистем – криптосистеми Цезаря, афінної криптосистеми, криптосистеми Віженера та криптосистеми Хілла. Розглянуто типові приклади застосування розроблених процедур для шифрування да дешифрування повідомлень. Також дано короткий опис названих криптосистем.

Література

1. Blythab B. Using Maple to implement eLearning integrated with computer aided assessment / B. Blythab, A. Labovic // International Journal of Mathematical Education in Science and Technology. – 2009. – 40(7). – P. 975–988.

2. Chvatalova Z. Education of Economics with Maple / Z. Chvatalova, J. Hrebicek // Proceedings of the 30th international conference mathematical methods in economics, Karvin, Czech Republic, 2012. – P. 435–440.

3. Wiest L. The Role of Computers in Mathematics Teaching and Learning / Lynda R. Wiest // Computers in the Schools: Interdisciplinary Journal of Practice, Theory, and Applied Research. – 2001. – 17(1-2). – P. 41–55.

4. Adym E. The use of computers in mathematics education: A paradigm shift from "computer assisted instruction" towards "student rogramming" / E. Adym // The Turkish Online Journal of Educational Technology. – 2005. – 4(2). – P. 27–34.

5. Adams P. Introduction To Mathematics With Maple / Adams P., Smith K., Vyborny R. – World Scientific Pub Co Inc, 2004. – 544 p.

6. Васильев А. Н. Maple 8. Самоучитель / А.Н. Васильєв. – М. : Диалектика, 2003. – 352 с.

7. Мао В. Современная криптографія / Мао В. ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2005. – 768 с.

8. Бедратюк Л.П. Використання системи комп'ютерної алгебри Maple для розв'язання задач оптимізації / Л. Бедратюк, Г. Бедратюк // Вісник ХНУ. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2014. – № 5(217). – С. 247–252.

9. Бедратюк Л.П. Computer algebra systems in graph theory / Л. Бедратюк, Г. Бедратюк // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2012. – Vol. 6, N 4(60). – P. 43–46.

10. Бедратюк Л.П. Computer algebra systems in the elementary number theory / Л. Бедратюк, Г. Бедратюк // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – Vol. 6, N 4(66). – P. 10–13.

Рецензія/Peer review : 9.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 004.89

Л.О. ЛІТВІЦЬКИЙ, В.М. ЧЕШУН, В.І. ЧОРНЕНЬКИЙ
Хмельницький національний університет

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ДЕКОДЕРА ПЕРЕШКОДОСТІЙКИХ КОДІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

В роботі розглянуто загальні принципи організації декодера перешкодостійких блочних кодів на базі тришарової штучної нейронної мережі, описано особливості настроювання і функціонування штучних нейронів кожного шару, наведено пояснення щодо організації роботи декодера для прикладу його застосування для кодів Хеммінга.

Ключові слова: коди Хеммінга, штучні нейронні мережі.

L.O. LITVITSKIY, V.M. CHESHUN, V.I. CHORNENKIY
Khmelnytskyi National University, Ukraine

FUNCTIONAL FEATURES ORGANIZATION OF ERROR-CORRECTING DEVICES FOR NOISE-CODES BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract - This paper discusses the use of artificial neural networks to improve the efficiency of the decoders of block noise codes. The general principles of anti-noise block codes decoder based on the three-layered artificial neural network tuning features described and functioning artificial neurons each layer, explains on the organization of a decoder for an example of its application for Hamming codes. The results indicate that the anti-noise block code decoders based on artificial neural networks have the ability to ensure the reduction of process time error correction and get the right results in a situation where traditional algorithms only fix mistakes.

Keywords: Hamming codes, artificial neural network.

Вступ

Застосування перешкодостійких кодів базується на чотирьох типових операціях: кодування, декодування, виявлення і корекція помилок. Серед зазначених операцій найбільш складною і тривалою є саме корекція помилок, оскільки її виконання апаратними засобами інформаційних систем, в більшості випадків, є процесом ітераційним і пов'язане з ризиком неможливості отримання вірного результату традиційними алгоритмами через виникнення в повідомленнях помилок більшої за допустиму для обраного коду кратності [1].

Метою проведених досліджень було визначити можливості і принципи застосування апаратно-реалізованих штучних нейронних мереж (ШНМ) для підвищення ефективності роботи декодерів перешкодостійких кодів в операціях декодування, виявлення і корекції помилок.

Загальні принципи організації декодера

Для пояснення принципів організації і дії нейромережного декодера (НД) обрано систему передачі двійкових повідомлень з чотирьох інформаційних розрядів (загалом 16 варіацій), для кодування яких застосовується код Хеммінга з чотирма контрольними розрядами (три класичних для коду Хеммінга і додатковий з кодуванням до парності). Такий код застосовується для корекції одиночних помилок, але може виявляти та, за поглибленого аналізу і дотримання ряду додаткових умов, корегувати більшу кількість помилок [1].

Усунення ітераційної (циклічної) складової процесу корекції помилок та збільшення ефективності за критерієм кратності корегованих помилок стає досяжним при реалізації декодера на основі ШНМ. Для цього застосовується принцип дії мережі Хопфілда [2].

Якщо в каналі передачі даних не відбувалось зашумлень, тоді на вході декодера буде допустимий код і з його декодуванням не виникне проблем. Мережа Хопфілда використовується для вирішення конфліктів, коли вхідний вектор виявляється схожим більш ніж на одну кодову комбінацію з можливих 16. Тобто, незважаючи на те, що повідомлення може надходити спотвореним, воно все одно буде порівняне з усіма варіантами допустимих кодових комбінацій та прийме участь у остаточному рішенні, до якого вхідного вектора воно найближче [3].

ШНМ організовується у вигляді структури з трьох шарів, яких достатньо для вирішення поставленої задачі. Кількість штучних нейронів (ШН) першого шару відповідає розрядності отримуваних кодових комбінацій (8), а кількість ШН другого – кількості повідомлень (16). Нумерація шарів починається з нульового, оскільки вхідний шар не отримує вхідні сигнали від інших нейронів свого шару.

Три шари ШНМ мають наступне призначення:

- шар 0 – вхідний шар, складається з 8 нейронів, що отримують вхідний вектор;
- шар 1 – перший шар, складається з 16 ШН з образами правильних варіантів кодів;
- шар 2 – другий шар (мережа Хопфілда), складається з 16 ШН і відповідає за визначення самого сильного нейрону з попереднього шару.

Опис особливостей функціонування декодера

Ініціалізація роботи ШНМ відбувається подачею на входи коду закодованого повідомлення з 8 біт, кожен біт надходить на один нейрон вхідного шару. Якщо мережа має 8 активних входів, то значення ваг від ШН вхідного шару до ШН шару змагань встановлюються за правилами:

$$t_{ij}(0) = 1,\ \ b_{ij}(0) = \frac{t_{ij}}{1+n},$$

де t_{ij} – вага зв'язку від j-го нейрону вихідного прошарку до i-го нейрону вхідного прошарку; b_{ij} – вага зв'язку від i-го нейрону вхідного прошарку до j-го нейрону вихідного прошарку; i=0,…,n-1; j=0,…,m-1; n – довжина кодової комбінації; m – кількість дозволених кодових комбінацій.

При подачі наступного набору, відмінного від першого, зв'язки будуть оновлені – генеруються наступні нові кластери пам'яті декодера.

При надходженні чергового вектора X={x_i: i=0,…,n-1} генерується вихідний нейрон з номером m+1. У нього мають вже бути інші значення елементів. Єдине що не зміниться – значення ваг $t_{ij.}$ Тобто, так само, як і при ініціалізації, ваги зустрічних зв'язків нейронів першого шару відповідають вхідному вектору:

$$t_{i\ m+1} = x_i,\ \ b_{i\ m+1} = \frac{x_i}{0{,}5 + \sum_{k=0}^{n} x_k}$$

де i=0,…,n-1.

Для прикладу, якщо надходить сигнал 01101001, то всі ваги нейрону входу до нейрону першого шару будуть: b_{0j}=0; b_{1j}=0.22; b_{2j}=0.22; b_{3j}=0; b_{4j}=0; b_{5j}=0.22; b_{6j}=0; b_{7j}=0.22. Якщо ж надходить вектор 11111111, тоді b_{0j}=0.118; b_{1j}=0.118; b_{2j}=0.118; b_{3j}=0.118; b_{4j}=0.118; b_{5j}=0.118; b_{6j}=0.118; b_{7j}=0.118. За результатами розрахунку вагових коефіцієнтів нейронів першого шару вийшло, що майже усі гілки з'єднань мають значення 0.22 (лише перший та останній нейрони прошарку змагань мають значення 0.1 та 0.118 відповідно). Тобто для ідеальної активації першого нейрону, що відповідає за значення 00000000, мають прийти всі нулі, а для активізації останнього – всі одиниці.

В другому шарі має виявлятись значення, що більше влаштовує мережу. Для цього спочатку потрібно встановити параметр схожості для визначення переможців з першого шару.

Нехай на входи до блоку подається невідомий новий вектор X={x_i: i=0,…,n-1}. Кількість елементів кодової комбінації вхідного вектору 8 і їх значення можуть бути 0 або 1.

Відносно вхідного вектора на вході починають виконуються наступні дії:

1. Всі вихідні ШН першого шару робляться активними.

2. Для всіх активних ШН визначається значення функції активації:

$$f_j(x) = \sum_{i=1}^{n} b_{ij} * x_i,\ j=0,\ldots,n\text{-}1,$$

де b_{ij} – вага зв'язку від i-го ШН вхідного прошарку до j-го ШН вихідного прошарку; i=0,…,7; j=0,…,15.

В досліджуваному варіанті значення функції активації майже для всіх (окрім першого та останнього) ШН виходу першого шару дорівнює 0.8. Для першого ШН потрібно передбачити те, що за відсутності одиниць або наявності лише однієї одиниці в коді він має бути активним, що передбачено наступним пунктом.

3. Всі активні ШН мають пройти перевірку на схожість з запам'ятованими образами при ініціалізації:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} t_{im} * x_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \geq \rho,$$

де p – параметр схожості ($0 < p < 1$ – чим ближче значення p до 1, тим суворіше фільтрування значень, що порівнюються). Частковим випадком є активізація першого нейрона шару. Його нейрони мають пройти перевірку на виконання умови $0 \leq \sum_{i=1}^{n} x_i < 1$. Якщо контрольована умова не виконується, то перехід на п.5.

4. Визначена міра схожості між вхідним вектором та запам'ятованим образом переміщується до результуючої вибірки та активізується відповідний нейрон другого шару нейронної мережі.

5. Нейрон, що не проходить перевірки на схожість із збереженим образом, робиться неактивним.

Як видно з наведеного опису роботи блоку підготовки даних, на жодному етапі виконання розрахунків не відбувається зміна вагових коефіцієнтів як входу, так і виходу кожного нейрона. Це означає, що мережа не адаптується до кожної вхідної комбінації, а просто визначає схожість отриманої інформації до інформації, яка збережена в пам'яті. Це особливо корисно для випадків, коли на якість коду можуть впливати певні перешкоди, а мережа, в кращому випадку, повинна не просто вміти визначити на який саме код схожа вхідна комбінація, але й вміти аналізувати, на який саме елемент коду найчастіше приходить зашумлення. Тобто, в наступному шарі потрібно, щоб значення могли задаватись для кожного окремого випадку і модифікуватись у разі частого їх повторення.

В досліджуваній задачі також повинні враховуватись затримка активації та гальмування, адже всі ці параметри можуть впливати на кінцеву швидкість та продуктивність декодера. Порівняння на виході

кожного елементу прошарку змагань можна проводити завчасно задавши певне значення параметру *p*. Чим ближче це значення до 1, тим суворіший іде відбір. Для того, щоб на виході декодера отримувати лише всі базові значення, потрібно встановити *p*=0,9 . Для нормальної ж роботи декодера потрібно, щоб значення *p* було в межах 0,5-0,6.

Взагалі, робота першого прошарку не затягнута на тривалий час – скориставшись один раз на першому кроці значеннями його вагових коефіцієнтів, мережа більше не звертається до нього до наступного надходження вхідного вектору. Він має активізовувати тільки нейрони наступного шару.

Послідовність виконання операцій на другому шарі нейронної мережі.

1. На стадії ініціалізації мережі встановлюються вагові коефіцієнти синапсів:

$$w_{ij}^{(2)} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{m} x_i^{(k)} x_j^{(k)}, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases}$$

де *i* і *j* – індекси, відповідно, передсинаптичного і післясинаптичного нейронів; $x_i^{(k)}$, $x_j^{(k)}$ – *i*-й і *j*-й елементи вектора *k*-го зразка.

2. На входи мережі подається невідомий сигнал (x-номер ітерації). Його поширення безпосередньо встановлює значення виходів нейронів у відповідні значення $y_i^{(0)} = x_i$ (нуль у дужках справа над y_i означає нульову ітерацію в циклі роботи мережі), $i = 0,...,n-1$. Через це, позначення на схемі мережі вхідних сигналів у явному вигляді носить суто умовний характер.

3. Розраховується новий стан нейронів $s_j(t+1) = \sum_{i=0}^{n} w_{ij}(t)$, коли j=0...n-1, і нові значення виходів $y_j(t+1) = f\left[s_j(t+1)\right]$, де f – функція передачі сигналу (у вигляді порогової функції).

4. Перевірка того, чи змінилися вихідні значення виходів за останню ітерацію. Якщо так - перехід до пункту 2, інакше (якщо виходи стабілізувались) – кінець проведення ітерацій. При цьому вихідний вектор являє собою зразок, що найкраще відповідає вхідним даним.

Після виконання останнього 4 кроку мережа Хопфілда завершує свою роботу. Один нейрон, що залишився активним, відповідає лише за один варіант декодування вхідного коду. Цей один сигнал надходить на вихід декодера і вже поширюється далі.

Значення виходу нейронної мережі може активізовувати відповідний номер декодованого слова, але це вже вирішується за межами цієї системи.

Висновки

Отримані результати свідчать, що для реалізації нейромережного декодера перешкодостійких блочних кодів вистачає ШНМ з трьох шарів, можливостей яких достатньо для вирішення поставленої задачі. Коректна та якісна робота кожного наступного шару мережі залежить від попереднього. Для ефективної роботи ШНМ потрібно максимально точно підібрати значення латерального гальмування в другому шарі та параметр схожості в першому шарі.

Застосування ШНМ для апаратної реалізації декодера дозволяє зменшити тривалість процесу корекції помилок і отримувати вірний результат в ряді ситуацій, коли традиційні алгоритми декодування лише фіксують наявність помилок.

Література

1. Королёв А.И. Коды и устройства помехоустойчивого кодирования: научно-практическое издание / Королёв А.И. – Минск : Бестпринт , 2002. – 286 с.

2. Бодянський Є.В. Штучні нейронні мережі / О.Г. Руденко, Є.В. Бодянський. – Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.

3. Березкин А.А. Альтернативное декодирование помехоустойчивых кодов с использованием нейронных сетей / А.А. Березкин // Труды учебных заведений святи. – 2006. – № 175. – С. 8–15.

Рецензія/Peer review : 23.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д. т. н., проф. Мясіщев О.А.

УДК 004.054

М.О. ГУМЕНЮК, В.В. МАРМОЛЮК, В.М. ЧЕШУН
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЬ ТА ОЦІНОЧНІ ФУНКЦІЇ ПІДГОТОВКИ ДАНИХ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ДИНАМІЧНОГО СИНТЕЗУ ДИСКРЕТНИХ ТЕСТІВ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ

В роботі представлено елементи математичної моделі і систему оціночних функцій, що використовуються для апріорної перевірки вхідних даних при розробці умовних алгоритмів діагностування, орієнтованих на реалізацію адаптивного динамічного синтезу дискретних тестів апаратними засобами мікропрограмних генераторів тестових послідовностей для діагностування цифрових пристроїв.

Ключові слова: тестова діагностика, синтез тестів, математична модель, цифрові пристрої.

M.O. GUMENYUK, V.V. MARMOLYUK, V.M. CHESHUN
Khmelnytskyi National University, Ukraine

MODEL AND DATA-READINESS FUNCTIONS FOR ADAPTIVE DYNAMIC SYNTHESIS OF DISCRETE TEST FOR DIGITAL DEVICES

Abstract - The work deals with the preparation of data for the development of diagnostics algorithms with control of conditions , which are focused on the implementation of the automatic adaptive test generation process for digital devices. In the work considered the problems that may arise during the organization process of testing digital devices using fixed of input data. is selected elements of the mathematical model and the system of data-readiness functions, that are designed to verify input data for development of discrete test for digital devices. The results are the basis for the development of algorithmic synthesis of discrete systems provide test hardware and can be used in problems of test-optimization.

Keywords: diagnostics test, test generation, mathematical model, digital devices.

Вступ

Дослідження сучасних цифрових пристроїв (ЦП) як об'єктів діагностування (ОД) показує, що поточний етап розвитку цифрової техніки характеризується широкомасштабним використанням надвеликих інтегральних схем (НВІС), що зумовлює потребу у використанні для діагностування зазначених компонентів надзвичайно великих тестових послідовностей. Великі розмірності тестових послідовностей призводять до збільшення тривалості процесу діагностування і зменшення продуктивності технічних засобів діагностування.

Проведений аналіз показав, що довжина тестових послідовностей, які використовуються для діагностування ЦП з НВІС, може бути значним чином зменшена за рахунок поступового їх формування в процесі діагностування з урахуванням результатів попередніх перевірок. Такий підхід є характерним для умовних (адаптивних) алгоритмів діагностування, які базуються не на використанні однозначно заданої тестової послідовності, а передбачають її формування на підставі аналізу отримуваних в процесі діагностування відповідних реакцій ОД згідно із умовами, які перевіряються на фіксованих етапах процесу тестування [1].

Інша проблема зумовлена стрімким зростанням робочих частот цифрових пристроїв, що призводить до збільшення питомої ваги несправностей динамічного типу, локалізація яких є можливою лише при проведенні тестових перевірок на максимальних робочих частотах ОД. Оскільки програмна обробка відповідних реакцій не може бути реалізована з необхідною швидкістю, постає задача їх повної апаратної реалізації. На сьогоднішній день існують окремі рішення цієї задачі [1, 2], але вони характеризуються досить великою складністю.

Проведені дослідження показують, що існує принципова можливість забезпечити необхідну для реалізації умовних алгоритмів діагностування продуктивність і функціональну гнучкість генераторів тестів за умови застосування при їх розробці принципів дії мікропрограмних автоматів.

Модель діагностичного процесу

За основу для математичної моделі взято математичний апарат, описаний в [3].

Процес тестових випробувань будь-якого цифрового вузла має за мету встановлення його технічного стану шляхом аналізу відповідних реакцій, що надходять з ОД при подачі на вхідні контрольні точки векторів тестових впливів. Тобто, для моделювання процесу тестування ОД необхідний інструментарій для опису станів ОД, використовуваних в процесі діагностування векторів тестових впливів та отримуваних векторів відповідних реакцій. Особливістю тестування ОД з елементами пам'яті, до числа яких на сьогоднішній день відносяться майже всі ЦП, є те, що майже будь-яка їх елементарна перевірка потребує застосування не окремого тест-вектора, а їх множини, тобто, блоку тест-векторів. Кожен блок характеризується фіксованою послідовністю розташування в ньому утворюючих тест-векторів. Аналогічно, в результаті подання на ОД послідовності тест-векторів очікуваним є отримання послідовності векторів відповідних реакцій (блоку векторів відповідних реакцій).

Отже, до математичної моделі включаємо суттєві для поставленої задачі елементи опису можливих станів ОД, блоків тестових векторів і еталонів відповідних реакцій, сформувавши їх на основі теорії множин.

L:{y_1, y_2 ,...,y_i ,...,y_n} – множина можливих станів ОД, де y_i – стани ОД (i=1,2,…,n), що визначаються наявністю або відсутністю в його структурі дефектів; n =|L| - кількість досліджуваних станів.

T:{t_1,t_2,…,t_i,…,t_k} – множина блоків тест-векторів, призначених для розробки алгоритму перевірки ОД, де t_i – i-й блок тест-векторів, що належить вказаній множині; k - кількість блоків тест-векторів, k = | T | .

R^{em}:{r_1^{em},r_2^{em},…,r_i^{em},…,r_k^{em}} – множина еталонних значень блоків векторів відповідних реакцій, що формуються для кожного блоку $t_i \in T$ моделюванням роботи ОД в справному стані (як правило, це $y_1 \in L$).

Метою кожного елементарного випробування ОД із застосуванням будь-якого блоку тест-векторів $t_i \in T$ є спростування гіпотези про можливість знаходження досліджуваного ОД в одному або декількох з станів $y_m \in L$. Спростування (або підтвердження) гіпотези про можливість знаходження досліджуваного ОД в стані $y_m \in L$ виконується за результатами порівняння отримуваних для блоку тест-векторів $t_i \in T$ відповідних реакцій ОД r_i із заздалегідь визначеними для $t_i \in T$ еталонами відповідних реакцій ОД $r_i^{em} \in R^{em}$.

Для автоматизації процесу синтезу алгоритмів діагностування і обробки отримуваних результатів введемо булеву ознаку φ_m^i, значення якої будемо визначати для $t_i \in T$ і $y_m \in L$ за правилом:

$$\begin{cases} \varphi_m^i = 0, \text{ якщо } r_i = r_i^{em}; \\ \varphi_m^i = 1, \text{ якщо } r_i \neq r_i^{em}. \end{cases} \quad (1)$$

Фактично, за результатами елементарного випробування із застосуванням блоку тест-векторів $t_i \in T$ множина допустимих на n-му етапі станів ОД L^n за ознакою φ_m^i може бути розділена на дві підмножини: $L_0^n(t_i)$ і $L_1^n(t_i)$ (нижній індекс відповідає значенню φ_m^i); $L_0^n(t_i) \cap L_1^n(t_i)=0$, $L_0^n(t_i) \cup L_1^n(t_i)=L^n$. За таких умов, при отриманні у відповідь на $t_i \in T$ значення $r_i = r_i^{em}$ спростовується гіпотеза про можливість знаходження ОД в будь-якому зі станів, що входять до множини $L_1^n(t_i)$, і навпаки, при отриманні у відповідь на $t_i \in T$ значення $r_i \neq r_i^{em}$ спростовується гіпотеза про можливість знаходження ОД в будь-якому зі станів, що входять до множини $L_0^n(t_i)$. Якщо на певному етапі діагностичного експерименту отримується множина допустимих станів $|L_0^n|=1$ (або $|L_1^n|=1$), це свідчить про ідентифікацію стану ОД $y_m \in L$.

В ряді діагностичних задач, зокрема, при перевірках ОД з урахуванням особливостей прояву несправностей динамічного типу, потрібно враховувати як здатність окремих блоків тест-векторів ініціювати прояв несправностей, так і відповідну здатність у перехідних процесів при зміні блоків тест-векторів [3]. Для відображення відповідної властивості у сукупності t_i-t_j послідовно подаваних блоків тест векторів $t_i \in T$ і $t_j \in T$ введемо булеву ознаку ψ_m^{ij}, значення якої будемо визначати відносно стану ОД $y_m \in L$ за правилом:

$$\begin{cases} \psi_m^{ij} = 0, \text{ якщо при } \phi_m^i = 0 \quad r_j = r_j^{em}; \\ \psi_m^{ij} = 1, \text{ якщо при } \phi_m^i = 0 \quad r_j \neq r_j^{em}. \end{cases} \quad (2)$$

Ознаки ψ_m^i набувають актуальності, якщо для процесу діагностування відносно певних елементів $y_m \in L$, $t_i \in T$ і $t_j \in T$ допустимі ситуації, коли $\varphi_m^j \neq \psi_m^{ij}$.

За потреби наочного відображення особливостей розроблюваного алгоритму діагностування і контрольованих в ньому умов зручною у використанні є графічна модель у вигляді бінарного дерева рішень[4].

В якості прикладу проведемо синтез із множини блоків тест-векторів T:{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5} бінарного дерева рішень умовного алгоритму діагностування за наявності шести можливих станів ОД L:{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6}. Дані булевих ознак φ_m^i і ψ_m^{ij} щодо можливості розрізнення станів ОД наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для розробки алгоритму діагностування

y_m	φ_m^1	φ_m^2	φ_m^3	φ_m^4	φ_m^5	ψ_m^{11}	ψ_m^{12}	ψ_m^{13}	ψ_m^{14}	ψ_m^{15}	ψ_m^{21}	ψ_m^{22}	ψ_m^{23}	ψ_m^{24}	ψ_m^{25}	ψ_m^{31}	ψ_m^{32}	ψ_m^{33}	ψ_m^{34}	ψ_m^{35}	ψ_m^{41}	ψ_m^{42}	ψ_m^{43}	ψ_m^{44}	ψ_m^{45}	ψ_m^{51}	ψ_m^{52}	ψ_m^{53}	ψ_m^{54}	ψ_m^{55}
y_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y_2	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
y_3	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
y_4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
y_5	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
y_6	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Бінарне дерево рішень одного з можливих варіантів реалізації умовного алгоритму діагностування за наданими вхідними даними наведено на рис.1.

Оціночні функції підготовки даних

З наведеного прикладу видно, що при побудові бінарного дерева рішень використано не всі елементи множини *T*, що свідчить про наявність надлишковості в наданих для розробки умовного алгоритму діагностування вихідних даних. З іншої сторони, можливими є ситуації, коли надані вихідні дані виявляються недостатніми для розробки умовного алгоритму діагностування із необхідними властивостями щодо можливості ідентифікації стану ОД із заданою точністю. Оскільки робота як з недостатнім, так і з надлишковим набором даних при розробці алгоритмів діагностування зумовлює зниження ефективності та збільшення вартості виконуваних робіт, виникає потреба проведення апріорної перевірки наявних даних, що може бути реалізовано із застосуванням введених в модель булевих ознак φ_m^i і ψ_m^{ij}. Нижче наведено функції, які дозволяють провести оцінку наданих для синтезу тестів даних на достатність та безнадлишковість.

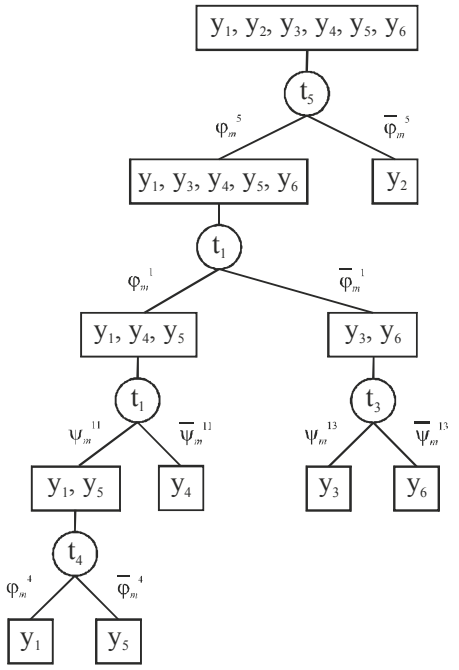


Рис.1. Бінарне дерево рішень умовного алгоритму діагностування

Функція для визначення можливості досягнення заданої глибини діагностування при контролі за принципом «справний–несправний»:

$$\prod_{m=1}^{L}\left(\sum_{i=1}^{|T|}\left(\varphi_m^i+\sum_{j=1}^{|T|}\psi_m^{ij}\right)\right)>0 \qquad (3)$$

Функція для визначення можливості досягнення заданої глибини діагностування при діагностуванні з ідентифікацією стану ОД:

$$\prod_{m=1}^{|L|}\prod_{l=m+1}^{|L|}\sum_{i=1}^{|T|}\left(\left(\varphi_m^i\oplus\varphi_l^i\right)+\sum_{j=1}^{|T|}\left(\psi_m^{ij}\oplus\psi_l^{ij}\right)\right)>0\ . \qquad (4)$$

Функція для визначення можливості розрізнення станів ОД $y_m \in L$ та $y_l \in L$ блоками тест-векторів $t_i \in T$:

$$\sum_{i=1}^{|T|}\left(\left(\varphi_m^i\oplus\varphi_l^i\right)+\sum_{j=1}^{|T|}\left(\psi_m^{ij}\oplus\psi_l^{ij}\right)\right)>0\ . \qquad (5)$$

Функція для виявлення надлишкових блоків тест-векторів, усунення яких не змінює досяжну глибину діагностування:

$$(\forall j\neq i)\&(\forall k\neq i):\sum_{m=1}^{|L|}\left(\varphi_m^j-1\right)*\varphi_m^j+\sum_{k=1}^{|T|}\sum_{m=1}^{|L|}\left(\left(\psi_m^{jk}-1\right)*\psi_m^{ik}+\left(\psi_m^{kj}-1\right)*\psi_m^{ki}\right)=0\ . \qquad (6)$$

Висновки

На основі елементів пропонованої математичної моделі процедура синтезу бінарних дерев рішень, що є графічним відображенням умовних алгоритмів діагностування, відрізняється простотою і зручністю для автоматизованої алгоритмічної реалізації. Функції 3-6 є основою алгоритмів підготовки даних для реалізації автоматичного адаптивного динамічного синтезу дискретних тестів апаратними засобами мікропрограмного генератора тестових послідовностей при перевірці цифрових пристроїв різної складності.

Література

1. Чешун В.М. Реалізація умовних алгоритмів комбінованого діагностування апаратними засобами / В.М. Чешун // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : збірник матеріалів конференції. – Хмельницький : ТУ Поділля, 1997. – С. 64–65.

2. Чорненький В.І. Алгоритми діагностування цифрових пристроїв апаратними засобами на базі штучних нейронних мереж / В.І. Чорненький, В.М. Чешун // Зб. наук. праць Військового інституту Київського НУ ім. Тараса Шевченко. – К. : ВІКНУ, 2010. – Вип. 27. – С. 154–161.

3. Самусєв К.В. Математична модель для систематизації даних тестопридатного синтезу цифрових вузлів / К.В. Самусєв, В.М. Чешун // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2004. – № 4. – С. 171–174.

4. Кормен Т.Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т.Х. Кормен, Ч.И. Лейзерсон. Р.Л. Ривест, К. Штайн. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2005. – 1296 с.

Рецензія/Peer review : 18.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: доктор технічних наук, проф. Мясіщев О.А.

УДК 621.391

А.О. НІЧЕПОРУК
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЯВЛЕННЯ МЕТАМОРФНИХ ВІРУСІВ НА ОСНОВІ ПОРІВНЯННЯ ЇХ ПОВЕДІНКИ

В роботі запропоновано модель інформаційної технології виявлення метаморфних вірусів, що заснована на порівнянні їх поведінки з використання системи нечіткого логічного висновку. На базі моделей поведінки метаморфних вірусів формується висновок про інфікування виконуваного файлу метаморфним вірусом.

Ключові слова:метаморфні віруси, вектор ознак, поведінка.

A.O. NICHEPORUK
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

THE MODEL OF INFORMATION TECHOLOGY FOR DETECTION METAMORPHIC VIRUSES BASED ON THEIR BEHAVIOR

The paper presents a model of information technology detect metamorphic viruses based on their behavior compared with the use of fuzzy logic conclusion. On the basis of behavior of metamorphic virus infection conclusion executable metamorfnym virus.

Keywords: metamorphic virus, vector of signs, behavior.

Вступ

Стрімкий розвиток комп'ютерної техніки супроводжується пропорційним розвитком комп'ютерних вірусів. Факти несанкціонованого доступу чи пошкодження функціонування комп'ютерних систем (КС) свідчать, що сучасні антивірусні технології орієнтовані на виявлення існуючих шкідливих програм, зокрема метаморфних вірусів, проте не здатні в повному обсязі виявляти нові шкідливі сімейства метаморфних вірусів чи видозмінені копії вже існуючих [6].

Постановка задачі

Класичні методи виявлення, що засновані на сигнатурному аналізі, не здатні в повному обсязі протидіяти вірусній загрозі [1,2,4]. Дослідження Університету Сан Хосе, показали, що багато антивірусних засобів покладаються на сигнатурний пошук, та не здатні в повному обсязі виявляти нові метаморфні віруси [5].

Для виявлення метаморфних вірусів було запропоновано ряд рішень. У роботі [8] було запропоновано евристичний статичний метод виявлення метаморфних вірусів, на основі побудови графа потоку управління довільної довжини. Даний метод показав високі результати виявлення тестової вибірки. Проте, згаданий метод був застосований тільки до двох сімейств метаморфних вірусів (NGVCK та VCL32), причому тестова вибірка включала 60 зразків шкідливих програм, що є не достатнім для отримання достовірних даних.

Інший підхід базується на отриманні послідовності API викликів [9] шкідливого ПЗ. Запропонований метод використовує алгоритм вирівнювання оптимальної послідовності API викликів та порівняння їх схожості за допомогою косинус схожості, коефіцієнта Жакара та кореляції Пірсона. Основним недоліком даного методу є значний відсоток хибних спрацювань, оскільки схожість API викликів різних сімейств метаморфних вірусів є досить високою.

У роботі [3] представлено метод виявлення та класифікації шкідливого програмного забезпечення, що заснований на частоті появи інструкцій. Головним недоліком даного методу є низький відсоток виявлення метаморфних вірусів, що використовують техніку переміщення блоків.

Тому, є необхідність в розробці моделі інформаційної технології виявлення метаморфних вірусів, яка б стала основою розробки нових методів і засобів, які дозволили б отримати більш високий ступінь достовірності.

Об'єктом дослідження є структура,механізми функціонування, життєвий цикл поліморфних та метаморфних вірусних програм, що поширюються в PE EXE файли комп'ютерної системи та методи їх виявлення.

Предметом дослідження є інформаційна технологія діагностування комп'ютерних систем на наявність поліморфного та метаморфного програмного коду.

Основна частина

Виявлення поліморфних та метаморфних вірусів є одним з найбільш складних завдань, у зв'язку з використанням ними обфускації програмного коду, використання технології невизначеної точки входу (Entry-Point Obscuring) та антивідлагоджувальними техніками. Поліморфні та метаморфні віруси відносяться до множини шифрованих вірусів.

Шифровані віруси – віруси, що самі шифрують власний код для утруднення їх дизасемблювання і виявлення у файлі, пам'яті або секторі. Кожен екземпляр такого вірусу містить тільки короткий загальний фрагмент коду – процедуру розшифрування, яку можна використати в якості сигнатури, для їх виявлення. У разі кожного нового інфікування він автоматично зашифровує себе, і кожна нова його копія відрізняється від попередньої.

Поліморфний вірус (або вірус з самомодифікованими розшифровувачами), як і шифрований вірус, складається з зашифрованого тіла вірусу та процедури його розшифрування [5]. Проте, до складу поліморфних вірусів входить ще одна процедура – двигун мутації (mutation engine), що генерує довільні процедури розшифрування, що змінюються при кожному новому інфікуванні. Наприклад, він може шифрувати своє тіло використовуючи кожен раз різні ключі, та розшифровувати його під час активації. Цикл розшифрування мутує з кожним наступним поколінням вірусу.

На відмінну від поліморфних вірусів, метаморфні віруси можуть бути незашифровані. Функціонування метаморфного вірусу ґрунтується на здатності перекладати, редагувати та переписувати власний код при інфікуванні виконуваного файлу, що робить їх одними з найбільш небезпечних шкідливих програм [5]. Це є головною відмінністю від поліморфних вірусів, що шифрують власне тіло, для уникнення виявлення антивірусними засобами.

Запропонована модель заснована на тому, що, незважаючи на зміну шкідливого коду метаморфного вірусу, його поведінка та виконувані функції залишаються сталими.

Модель процесу складається з наступних кроків:

- дизасемблювання підозрілого коду *Fp*;
- аналіз та побудова вектора ознак для *Fp*;
- емуляція виконання *Fp* та отримання зразка коду *Fs*;
- дизасемблювання *Fs*;
- побудова вектора ознак для *Fs*;
- порівняння векторів ознак для *Fp* та *Fs*;
- збір векторів ознак зразків підозрілих кодів з мережі;
- здійснення нечіткого логічного висновку щодо приналежності підозрілого коду до множини метаморфних вірусів на основі бази моделей поведінок метаморфних вірусів.

Метаморфні віруси відносяться до класу програм, що змінюються при кожному новому інфікуванні. Проте, для уникнення виявлення, деякі зразки метаморфних вірусів здатні розпізнавати виконання у захищеному середовищі, шляхом перевірки апаратних складових системи (підтримка особливих наборів інструкцій, тип пам'яті, розрядність системи та ін) та програмного налаштування системи. При запуску програми їй виділяється визначений адресний простір, стек та інші структури даних, що динамічно змінюються в часі. Відповідно, одній і тій самій програмі, що запущена на одному хості кожного разу буде виділятися нові адреси у пам'яті при кожному новому запуску. Тому, емуляція виконання на кожному хості у корпоративній мережі однієї і тієї ж програми дозволить підвищити імовірність розгортання метаморфного вірусу і, відповідно, отримати змінені копії одного і того ж вірусу. Окрім того виконання емуляції на кожному хості дозволить розпаралелити процес, що знизить апаратні витрати кожної системи.

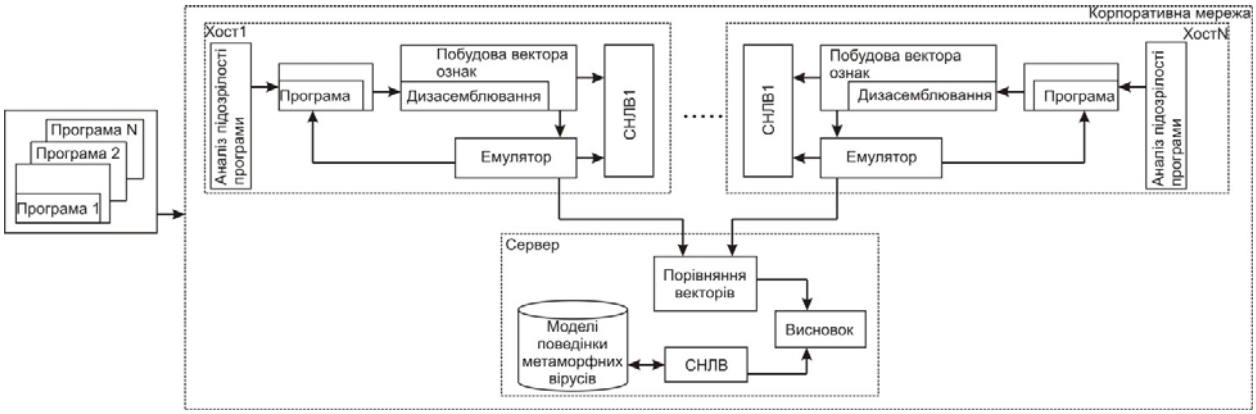


Рис 1 Узагальнена схема моделі виявлення метаморфних вірусів

Розглянемо детальніше кожну складову системи виявлення метаморфних вірусів у корпоративній мережі.

З метою аналізу підозрілої програми, на етапі дизасемблювання машинний код перетворюється на інструкції асемблера.

На основі отриманого коду, будується вектор ознак для підозрілого коду *Fp*, який може бути поданий наступним чином,

$$\overline{\Psi} = (C_T, C_A, C_L, C_S, C_M, C_J, C_{EP}, C_{ID}, C_{VA}, C_{NS}, C_{RVA}, \overline{\Theta}), \quad (1)$$

де $C_T, C_A, C_L, C_S, C_M, C_J$ – ознаки перевищення частки команд типу пересилки даних, арифметичних, логічних, роботи зі стеком, керування та переходів відповідно;

Для класифікації шкідливого коду авторами [4] було здійснено аналіз частоти появи інструкцій у виконуваних файлах PE EXE. В результаті було отримано відсоткове співвідношення команд певного типу до загальної кількості всіх команд. Було з'ясовано що 90,5% від загальної кількості всіх команд становлять 14 команд архітектури x8086 (mov, push, call, pop, cmp, jz, lea, test, jmp, add, jnz, rtn, xor, and).

Для нашого дослідження дані команди були розподілені на 6 груп: арифметичні, логічні, пересилки даних, керування, переходів, роботи зі стеком.

Таблиця 1

Умова активізації ознак перевищення частки команд типу пересилки даних, арифметичних, логічних, роботи зі стеком, керування та переходів

Команда		Вірус, %	Довірений додаток, %	Умова активізації ознаки вектора
Команди пересилки даних				
K_{mov}	mov	16.1	25.3	$\{(16.1 \le K_{mox} \le 25.3) \vee (K_{mov} < 16.1)\}$
K_{lea}	lea	5.5	3.9	$\{(3.9 < K_{lea} \le 5.5) \vee (K_{lea} > 5.5)\}$
Арифметичні команди				
K_{add}	add	3.5	3.0	$\{(3.0 < K_{add} \le 3.5) \vee (K_{add} > 3.5)\}$
Команди роботи зі стеком				
K_{push}	push	19.5	22.7	$\{(19.5 \le K_{push} < 22.7) \vee (K_{push} \ge 22.7)\}$
K_{pop}	pop	6.3	7.0	$\{(2.7 \le K_{pop} < 5.0) \vee (K_{pop} \ge 5.0)\}$
Логічні команди				
K_{and}	and	1.5	1.3	$\{(1.3 < K_{and} < 1.5) \vee (K_{and} \ge 1.5)\}$
K_{xor}	xor	2.1	1.9	$(1.9 < K_{xor} < 2.1)$
Команди керування				
K_{retn}	retn	2.0	2.2	$\{(2.0 < K_{retn} \le 2.2) \vee (K_{retn} < 2.0)\}$
K_{call}	call	9.1	8.7	$\{(8.7 < K_{call} \le 9.1) \vee (K_{call} > 9.1)\}$
Команди передачі керування				
K_{jmp}	jmp	2.7	3.0	$(2.7 \le K_{jmp} < 3.0)$
K_{jnz}	jnz	3.2	2.6	$\{(2.6 < K_{jnx} \le 3.2) \vee (K_{jnz} > 3.2)\}$

Значення ознаки перевищення частки команд пересилки даних C_T вектору $\overline{\Psi}$ можна визначити:

$$C_T = \begin{cases} 2, if\ (K_{mov} \in [16.1, 22.2)\ or\ K_{mov} < 16.1)\ and\ (K_{lea} \in [3.9, 5.5)\ or\ K_{lea} > 5.5) \\ 1, if\ (K_{mov} \in [16.1, 22.2)\ or\ K_{mov} < 16.1)\ and\ (K_{lea} \notin [3.9, 5.5)\ or\ K_{lea} < 5.5) \\ or\ (K_{mov} \notin [16.1, 22.2)\ or\ K_{mov} > 16.1)\ and\ (K_{lea} \in [3.9, 5.5)\ or\ K_{lea} > 5.5) \\ 0, otherwise \end{cases}$$

З урахуванням значень із таблиці 1, ознаки C_A, C_L, C_S, C_M, C_J визначаються аналогічним чином.

C_{EP} – наявність зміни точки входу програми; Одним із найбільш поширених методів інфікування файлів вірусом є зміна точки входу у програму, тобто заміщення оригінальної адреси з якої починається виконання файлу на адресу першої команди підпрограми вірусу, що відповідає за розшифрування основного тіла вірусу, у випадку зашифрованих вірусів, або на адресу першої команди тіла вірусу, якщо вірусне тіло незашифроване.

Точка входу у довірених додатків зазвичай розміщується у заголовку виконуваного файлу, тому поява її у іншій секції свідчить про інфікування вірусом EXE файлу.

Визначимо вектор зміни параметрів секції:

$$\overline{\Theta} = (S_N, Q_S, V_S, A)\ ,$$

де S_N – зміна назви секції виконуваного файлу

Q_S – зміна ознаки фізичного розміру секції виконуваного файлу

V_S – зміна ознаки віртуального розміру секції виконуваного файлу

A – зміна атрибуту секції виконуваного файлу

$$F = \begin{cases} S_i(S_N, Q_S, V_S, A) \in \overline{\Theta}, i = \overline{1, C_{NS}} \\ 1, if\ (Fp_{S_N} \neq Fs_{S_N})\ or\ (Fp_{Q_S} \neq Fs_{Q_S})\ or\ (Fp_{V_S} \neq Fs_{V_S})\ or\ (Fp_A \neq Fs_A) \\ 0, otherwise \end{cases}$$

Тобто зміна однієї з ознак вектору зміни параметрів секції свідчить про зміну структури виконуваного файлу і вектор зміни параметрів секції встановлюється в 1.

Таблиця 2

Порівняння векторів ознак

$Fp\ \forall(\psi_1, \psi_2, ..., \psi_n) \in \Psi, \psi_i = 1$

C_T				C_A		C_L				C_S				C_M				C_J			
Fp		Fs		Fs	Fp	Fp		Fs		Fp		Fs		Fp		Fs		Fp		Fs	
mov		lea		add		and		xor		push		pop		retn		call		jmp		jnz	
16,1	15,8	5,5	5,4	3,5	3,5	1,5	1,4	2,1	2,1	22,7	22,7	7	7,1	9,1	9,1	2	2	2,7	2,8	3,2	3,2

C_{EP}		C_{ID}		C_{VA}		C_{NS}		C_{RVA}	
Fs	Fp	Fs	Fp	Fs	Fp	Fs	Fp	Fs	Fp
0x1000	0x6000	C:\	C:\	0x4680	0x8680	3	3	0x5200	0x5200

C_{ID} – зміна поля DataDirectory структури Image_Optional_Header;

C_{VA} – зміна значення поля віртуальної адреси VirtualAddres;

C_{NS} – зміна значення кількості секцій EXE файлу NumberOfSection;

C_{RVA} – наявність зміни поля RVA значення в кожній структурі Image_Import_Descriptor.

Ознаки $C_T, C_A, C_L, C_S, C_M, C_J$ визначають наявність частки команд відповідного типу, що представлена у відсотках, від загальної кількості команд підозрілого файлу, відносно довірених додатків [4],

Якщо частка для підозрілого коду перевищує визначене порогове значення, то відповідний елемент вектора позначається “1”, інакше – “0”.

Після отримання вектору ознак з емулятора необхідно порівняти отримане значення із вектором ознак, що сформувався після дизасемблювання.

В реальних умовах з метою імітації виконання підозрілого коду використовується емулятор. Використання емулятора надасть можливість отримати змінені версії метаморфного вірусу *Fs*.

Для аналізу підозрілої програми *Fs* та створення вектору ознак, код після емуляції виконання перетворюється у машинний код.

На наступному кроці будується вектор ознак для коду, отриманого після емуляції виконання.

На наступному етапі відбувається порівняння векторів ознак для *Fp* та *Fs*, і якщо вони відрізняються, то формується висновок про наявність метаморфного вірусу в системі.

Проте, деякі сімейства метаморфних вірусів здатні розпізнавати здійснення емуляції в віртуальному середовищі та приховувати свою шкідливу діяльність. Тому на наступному етапі висновок щодо приналежності підозрілого коду до множини сімейств метаморфних вірусів здійснюється за допомогою системи нечіткого логічного висновку, яка заснована на базі моделей поведінок метаморфних вірусів.

Моделі поведінки представлені базою ознак прояву функцій шкідливого коду. Ознаки проявів функцій шкідливого коду, представлені шістьма рівнями моделей поведінок поліморфних (метаморнфних) вірусів [7].

Приймемо модель метаморфного вірусу кортежем:

$$M_6 = (A, E, U, C, R)$$

де A - множина команд певної програми, яка може бути інфікована вірусом, $A = \{a_1, ..., a_n\}$; E - множина вірусних команд розшифровувача, $E = \{e_1 ... e_\theta\}$; U- множина шкідливих команд (тіло віруса), $U = \{u_1, ..., u_w\}$; C - функція утворення поведінки поліморфного вірусу R шляхом розміщення команд програми a_i, команд розшифровування, команд тіла вірусу блоками в певному порядку, $C: A \times E \times U \to R$; функція утворення поліморфного вірусу R без вкорінення у певну програму матиме вигляд: $C: E \times U \to R$.

Поведінки вірусу шостого рівня поліморфізму R_6^A та R_6 можуть бути представлені послідовностями: $R_6^A = a_1 e_\phi ... a_i e_\eta a_{i+1} u_\vartheta ... a_n u_\sigma$; $R_6^A = a_1 e_\phi u_\vartheta ... a_n e_\eta u_\sigma$; $R_6 = e_\phi ... e_\eta u_\vartheta ... u_\sigma$; $R_6 = e_\phi u_\vartheta ... e_\eta u_\sigma$, де значення $\phi, \eta, \vartheta, \sigma$ визначають, що можливі команди розшифровувача та шкідливі

команди $e_\phi ... e_\eta u_\vartheta ... u_\sigma$ можуть бути різними для кожного нового запуску вірусу.

На наступному етапі проводиться збір векторів ознак зразків підозрілих кодів з мережі.

Висновок

Запропоновано модель інформаційної технології виявлення метаморфних вірусів на основі порівняння векторів ознак підозрілого файлу з його копією після емуляції виконання, та формування нечіткого логічного висновку на основі моделей поведінки метаморфних вірусів. Запропонована модель є основою реалізації методу виявлення нових метаморфних віусів або копій вже існуючих.

Література

1. Ször P. Striking Similarities: Win32/Simile and Metamorphic Virus Code, white paper. – Symantec Security Response, 2003.

2. Rad B.B. Metamorphic Virus Variants Classification Using Opcode Frequency Histogram / Rad B. B., Masrom M. – Proc. ICCOMP 10 the 14th WSEAS international conference of computers, 2011. – pp. 147-155.

3. Zhang Q. MetaAware: Identifying Metamorphic Malware / Q. Zhang, Douglas S. Reeve – Proc. Twenty Third Annual IEEE Conference on Computer Security Applications, 2007. – pp. 411-420

4. Bilar D. Statistical structure: fingerprinting malware for classification and analysis / D. Bilar – Proceding of black hat, 2008.

5. Kaspersky Lab What a metamorphic virus – Definition [Електронний ресурс] режим доступу: http://usa.kaspersky.com/internet-security-center/definitions/metamorphic-virus#.VkO9VdLhDIU

6. E. Al Daoud Computer virus strategies and detection methods / E. Al Daoud, I. H. Jebril, B. Qaibeh Open Problems compt., math., vol. 1 No.2 September 2008

7. Лисенко С. М. Метод виявлення поліморфного коду ботів ботнет-мереж / С. М. Лисенко, О. С. Савенко, А. О. Нічепорук // Радіоелектрон. і комп'ют. системи. - 2014. - № 5. - С. 129-134.

8. E. Al Daoud et al Detecting Metamorphic viruses by using Arbitrary Length of Control Flow Graphs and Nodes Alignment / Daoud E. Al. – UbiCC Journal, Vol. 4, No 3, pp.628–633, 2009.

9. A.H. Sung / Static analyzer of vicious executables (SAVE) A.H. Sung Proc. 20th Annual Computer Security Applications Conference, 2004.

Рецензія/Peer review : 4.11.2015 р. Надрукована/Printed :5.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

УДК 004.491.2

К.Ю. БОБРОВНІКОВА
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЯВЛЕННЯ БОТ-МЕРЕЖ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ DNS-ТРАФІКА

В роботі запропоновано модель інформаційної технології виявлення бот-мереж, яка ґрунтується на аналізі ознак, вилучених з корисного навантаження DNS-повідомлень. Модель заснована на властивості групової активності ботів в DNS-трафіку, враховує особливості поведінки груп хостів, властиві бот-мережам, та застосовує кластерний аналіз векторів ознак, які вказують на використання бот-мережами технологій ухилення від виявлення на основі DNS.

Ключові слова: бот-мережа, DNS-трафік, групова активність в DNS-трафіку, технології ухилення бот-мереж

K.Y.BOBROVNIKOVA
Khmelnitsky National University, Khmelnitsky, Ukraine

THE MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR BOTNETS DETECTION BASED ON DNS-TRAFFIC ANALYSIS

Abstract - The model of information technology for botnets detection that based on an analysis of the features obtained from the payload of DNS-messages was proposed. The model is based on the property of bots group activity in the DNS-traffic, takes into account abnormal behaviors of the hosts' group, which are similar to botnets, and uses a cluster analysis of the feature vectors, which indicate the botnet's usage the DNS-based evasion techniques.

Keywords: botnet, DNS-traffic, group activity in DNS-traffic, botnet`s evasion techniques

Вступ

Бот-мережі є одним з найбільш небезпечних видів шкідливого програмного забезпечення. Щороку по всьому світу бот-мережами інфікується близько 500 млн. персональних комп'ютерів, кожну секунду – близько 18 [1]. Бот-мережі використовуються для здійснення DDoS-атак, поширення шкідливого

програмного забезпечення, викрадення конфіденційних даних, організації анонімних проксі-серверів, з метою здійснення корпоративного шпіонажу, фішингу, поширення спаму, надання сервісу віддалених машин тощо.

Методи виявлення бот-мереж, засновані на фільтрації пакетів, аналізі трафіка на основі портів та відомих сигнатур обходяться зловмисником шляхом динамічної зміни шкідливого коду, системи керування та портів або використанням портів HTTP/S.

Переважна більшість бот-мереж для керування інфікованими хостами використовує DNS. На відміну від традиційних методів виявлення, методи на основі DNS не вимагають значних обсягів обчислювальних ресурсів та здатні виявляти ще невідомі боти.

Постановка задачі

DNS-запити ботів, що входять до складу мережі, вирізняються характерною ознакою – груповою активністю, тобто скоординованістю в DNS-трафіку, що полягає у здійсненні ними одночасних або зосереджених в невеликому проміжку часу DNS-запитах. Відомі методи, засновані на властивості групової активності в DNS-трафіку, описані в [2-4], мають наступні недоліки: потреба у значному часі обробки та великих обсягах обчислювальних ресурсів при застосуванні до великих мереж; спирання на групові запити лише однакових доменних імен або недостатня гнучкість механізму виявлення міграцій C&C-серверів та активності груп ботів; довільний поділ періоду моніторингу на інтервали, в межах яких здійснюється пошук інфікованих груп; коротка тривалість періоду моніторингу; необхідність додаткового збору мережного трафіка.

Існує ряд технологій ухилення від виявлення бот-мереж, які засновані на використанні DNS: періодична зміна IP-відображення для шкідливого домена (cycling of IP mapping), технологія «потік доменів» (domain flux), технологія «швидкозмінних» мереж (fast-flux service network) та DNS-тунелювання (DNS-tunneling). Застосування DNS-тунелювання дозволяє зловмиснику використовувати протокол DNS в якості носія для трафіку командування та контролю бот-мережею. Технологія «швидкозмінних» мереж полягає в поєднанні використання дуже коротких TTL-періодів та циклічного методу розподілення навантаження і забезпечення відмовостійкості round-robin DNS. Технології «потік доменів» та періодична зміна IP-відображення застосовують поєднання коротких TTL-періодів та частих змін доменного імені C&C-сервера та IP-адрес для доменного імені C&C-сервера відповідно. Використання цих технологій ускладнює виявлення та блокування C&C-серверів бот-мереж, проте може бути виявлене шляхом аналізу ознак, вилучених з корисного навантаження DNS-повідомлень. Основними недоліками методів, описаних в [5-7], які спрямовані на виявлення застосування технологій ухилення на основі DNS, є необхідність активного DNS-зондування, і тому неможливість реалізації на основі пасивного аналізу DNS-трафіка; необхідність залучення інформації, отриманої від інших сервісів (WHOIS тощо); зосередження на виявленні вузького кола шкідливого ПЗ.

Крім того, для багатьох видів бот-мереж властиві певні особливості поведінки ботів, які простежуються в DNS-трафіку та є нетиповими для DNS-запитів звичайних користувачів. Зазвичай неінфіковані хости в локальній мережі використовують локальні DNS-сервери для здійснення DNS-запитів; боти в локальній мережі можуть використовувати або локальні, або власні DNS-сервери чи безкоштовні сервіси DNS (OpenDNS, FreeDNS). Для багатьох видів бот-мереж характерним є ігнорування ботами TTL-періоду, який містився у відповіді від авторитативного DNS-сервера на DNS-запит. Це означає, що бот виконує очищення локального кеша DNS та здійснює повторний DNS-запит щодо доменного імені до завершення TTL-періоду, що надає можливість підвищити гнучкість та надійність керування бот-мережею. Для бот-мереж характерною є підвищена кількість DNS-відповідей з кодом помилки RCODE = 3 (NXDOMAIN, доменне ім'я не існує), пов'язаних з частою зміною доменного імені C&C-сервера бот-мережі або проблемами з його доступністю.

Тому метою роботи є розробка моделі інформаційної технології виявлення бот-мереж, яка грунтується на аналізі DNS-трафіка та усуває недоліки існуючих підходів.

Основна частина

Подамо модель інформаційної технології виявлення бот-мереж на основі аналізу DNS-трафіка наступним чином (рис.1):

$$M_D = \langle C_{TG}, C_{WB}, C_{GA}, C_{ET}, C_L \rangle, \quad (1)$$

де C_{TG} – процес збору вхідного DNS-трафіка; C_{WB} – процес співставлення запитаних доменних імен з «білим» та «чорним» списками; C_{GA} – процес виявлення групової активності в DNS-трафіку; C_{ET} – процес виявлення застосування технологій ухилення від виявлення бот-мереж на основі використання DNS; C_L – процес локалізації хостів, інфікованих ботами, та блокування дій ботів.

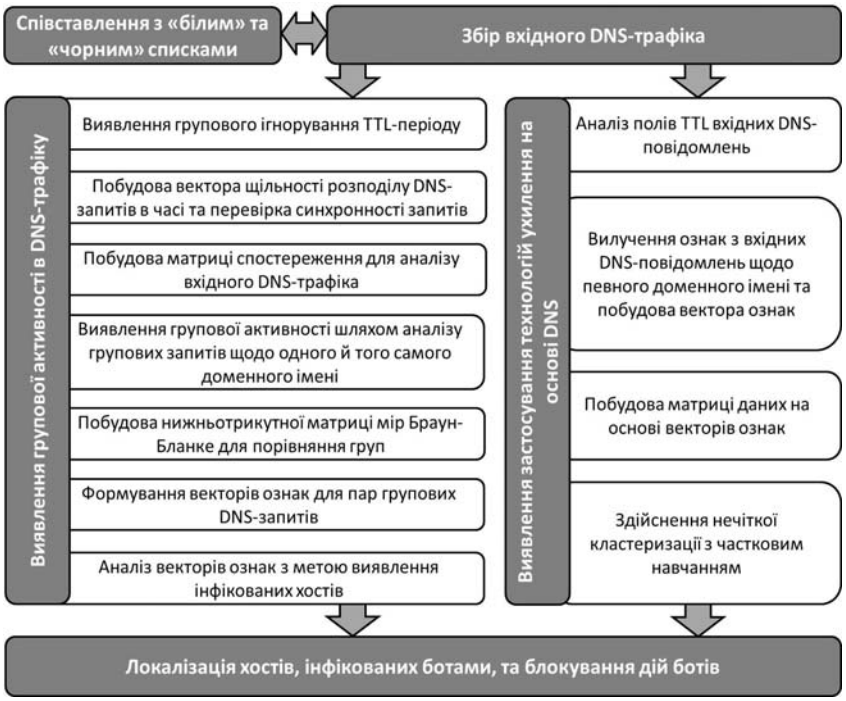


Рис.1. Узагальнена схема моделі інформаційної технології виявлення бот-мереж

Процес збору вхідного DNS-трафіка визначимо кортежем:

$$C_{TG} = \langle H, E, \chi \rangle, \tag{2}$$

де H – множина об'єктів діагностування – хостів мережі, які здійснювали DNS-запити протягом часу моніторингу; E – множина мережних давачів, налаштованих для збору вхідного DNS-трафіка; χ – множина захоплених вхідних DNS-повідомлень (DNS-відгуків).

Позначимо множину запитаних хостами мережі доменних імен як $D=\{d_i\}_{i=1}^{N_D}$, де N_D – кількість різних доменних імен. Представимо множину хостів мережі, які здійснювали DNS-запити протягом часу моніторингу, наступним чином: $H = \bigcup_{j=d_1}^{d_{N_D}} \bigcup_{k=1}^{N_T} H_{j,k}$, де H_j – підмножини MAC-адрес хостів, які надсилали DNS-запити щодо певного доменного імені протягом часу моніторингу; $H_{j,k}$ – підмножини MAC-адрес хостів, які надсилали DNS-запити щодо певного доменного імені в межах певного TTL-періоду; N_T – загальна кількість таких підмножин; $H_{j,k} = \{h_{j,k,i}\}_{i=1}^{N_{H,j,k}}$, де $h_{j,k,i}$ – MAC-адреса певного хоста мережі; $N_{H,j,k}$ – кількість хостів мережі, які надсилали DNS-запити в межах певного TTL-періоду. Аналогічно множину захоплених вхідних DNS-повідомлень представимо як $\chi = \bigcup_{j=d_1}^{d_{N_D}} \bigcup_{k=1}^{N_T} \chi_{j,k}$, де χ_j – підмножини вхідних DNS-повідомлень щодо певного доменного імені, захоплені протягом часу моніторингу; $\chi_{j,k}$ – підмножини вхідних DNS-повідомлень щодо певного доменного імені, захоплені в межах певного TTL-періоду; $\chi_{j,k} = \{\chi_{j,k,i}\}_{i=1}^{N_{\chi,j,k}}$, де $\chi_{j,k,i}$ – DNS-повідомлення, захоплене в межах певного TTL-періоду, $N_{\chi,j,k}$ – кількість DNS-повідомлень, захоплених в межах певного TTL-періоду.

З врахуванням полів вхідного DNS-повідомлення, дані з яких можуть бути використані для виявлення DNS-запитів бот-мереж, згідно стандарту RFC 1035 [8] опишемо захоплений DNS-відгук щодо певного доменного імені кортежем:

$$\chi_{j,k,i} = \left\langle \chi_{j,k,i,\text{H}}, \chi_{j,k,i,TS}, \chi_{j,k,i,IP}, \left\langle \chi_{j,k,i,HD}, \chi_{j,k,i,ANS}, \chi_{j,k,i,ATH}, \chi_{j,k,i,ADD} \right\rangle \right\rangle, \tag{3}$$
$$j = d_1, \ldots, d_{N_D}, k = \overline{1, N_T}, i = \overline{1, N_{\chi,j,k}},$$

де $\chi_{j,k,i,\text{H}}$ – MAC-адреса хоста, який здійснював DNS-запит; $\chi_{j,k,i,TS}$ – часовий штамп (час

надходження DNS-пакета); $\chi_{j,k,i,IP}$ – IP-адреса джерела DNS-пакета; $\chi_{j,k,i,HD}, \chi_{j,k,i,ANS}, \chi_{j,k,i,ATH}, \chi_{j,k,i,ADD}$ – секції DNS-повідомлення: заголовок (Header), секція відгуків (Answer), секція серверів імен (Authority) та секція додаткової інформації (Additional) відповідно.

Заголовок DNS-повідомлення може бути описаний наступним чином:

$$\chi_{j,k,i,HD} = \left\langle \chi_{j,k,i,HD,ID}, \chi_{j,k,i,HD,OPC}, \chi_{j,k,i,HD,RC}, \chi_{j,k,i,HD,QDC}, \chi_{j,k,i,HD,ANC}, \chi_{j,k,i,HD,NSC}, \chi_{j,k,i,HD,ARC} \right\rangle, \quad (4)$$
$$j = d_1,..., d_{N_D}, k = \overline{1, N_T}, i = \overline{1, N_{\chi,j,k}},$$

де $\chi_{j,k,i,HD,ID}$ – ідентифікатор, що дозволяє пов'язати запит та відгук (поле ID); $\chi_{j,k,i,HD,OPC}$ – тип запиту (поле OPCODE), $\chi_{j,k,i,HD,OPC} \in \{0,..,2\}$, 0 – стандартний, 1 – інверсний, 2 – запит стану сервера; $\chi_{j,k,i,HD,RC}$ – код відгуку (поле RCODE), $\chi_{j,k,i,HD,RC} \in \{0,..,5\}$, 0 – немає помилки, 1 – помилка в форматі запиту, 2 – збій сервера, 3 – доменне ім'я не існує тощо; $\chi_{j,k,i,HD,QDC}$ – кількість записів в секції запитів (поле QDCOUNT); $\chi_{j,k,i,HD,ANC}, \chi_{j,k,i,HD,NSC}, \chi_{j,k,i,HD,ARC}$ – кількість ресурсних записів в секціях відгуків, серверів імен та додаткової інформації (поля ANCOUNT, NSCOUNT, ARCOUNT) відповідно.

Секції відгуків, серверів імен та додаткової інформації мають однаковий формат та можуть бути описані як множини ресурсних записів наступним чином:

$$\chi_{j,k,i,S} = \left\{ \left(\chi_{j,k,i,S,NM}, \chi_{j,k,i,S,TP}, \chi_{j,k,i,S,TTL}, \chi_{j,k,i,S,RDL}, \chi_{j,k,i,S,RDT} \right)_n \right\}_{n=1}^{N_{RR,S}}, \quad (5)$$
$$j = d_1,..., d_{N_D}, k = \overline{1, N_T}, i = \overline{1, N_{\chi,j,k}},$$

де $S \in \{"ANS","ATH","ADD"\}$, $\chi_{j,k,i,S,NM}$ – ім'я домена, до якого відноситься ресурсний запис (поле NAME); $\chi_{j,k,i,S,TP}$ – тип коду ресурсного запису (поле TYPE), визначає значення та формат даних в полі RDATA [8]; $\chi_{j,k,i,S,TTL}$ – час життя записів DNS (поле TTL); $\chi_{j,k,i,S,RDL}$ – довжина поля RDATA (поле RDLENGTH); $\chi_{j,k,i,S,RDT}$ – рядок, що описує ресурс (поле RDATA); $N_{RR,S}$ – кількість ресурсних записів в секції (дорівнює значенню $\chi_{j,k,i,HD,ANC}, \chi_{j,k,i,HD,NSC}, \chi_{j,k,i,HD,ARC}$ для відповідної секції).

Процес співставлення запитаних доменних імен з «білим» та «чорним» списками визначимо кортежем:

$$C_{WB} = \langle D, W, B \rangle, \quad (6)$$

де W, B – множини доменних імен, занесених до «білого» списку популярних легітимних доменних імен та «чорного» списку відомих шкідливих доменних імен відповідно.

Процес виявлення групової активності в DNS-трафіку опишемо кортежем:

$$C_{GA} = \langle P_F, P_S, P_M, P_E, P_B, P_P, P_A \rangle, \quad (7)$$

де P_F – підпроцес виявлення групового ігнорування TTL-періоду; P_S – підпроцес побудови вектора щільності розподілу DNS-запитів в часі та перевірки синхронності запитів; P_M – підпроцес побудови матриці спостереження для аналізу вхідного DNS-трафіка; P_E – підпроцес виявлення групової активності шляхом аналізу групових запитів щодо одного й того самого доменного імені; P_B – підпроцес побудови нижньотрикутної матриці мір Браун-Бланке для порівняння груп; P_P – підпроцес формування векторів ознак для пар групових DNS-запитів; P_A – підпроцес аналізу векторів ознак з метою виявлення інфікованих хостів.

Підпроцес виявлення групового ігнорування TTL-періоду визначимо кортежем:

$$P_F = \langle \eta, \gamma \rangle, \quad (8)$$

де η – процедура побудови матриці спостереження V_{MAC}; γ – функція порівняння множин хостів для попереднього та повторного групових запитів в межах TTL-періоду.

Кожен рядок матриці спостереження V_{MAC} (рис.2) містить MAC-адреси хостів, які здійснювали DNS-запити щодо певного доменного імені в межах TTL-періоду. Якщо MAC-адреса хоста представлена в групі, то у відповідній комірці матриці відмічається «1», інакше – «0». Якщо хост повторно надсилав запит щодо доменного імені, то MAC-адреса хоста помічається «1» в рядку матриці, створеному для повторного запиту.

h_1	h_2	h_3	h_4	…	h_i
1	1	1	1	…	1
1	0	1	1	…	0

Рис.2. Матриця спостереження V_{MAC}

Процедуру побудови матриці спостереження V_{MAC} опишемо кортежем:

$$\eta = \left\langle D, \chi_{j,k}, \chi_{j,k,i,TS}, \chi_{j,k,i,ANS,TTL}, H_{j,k} \right\rangle, j = d_1,...,d_{N_D}, k = \overline{1, N_T}, i = \overline{1, N_{\chi,j,k}}. \quad (9)$$

Визначимо функцію γ порівняння двох множин хостів для попереднього та повторного групових запитів в межах TTL-періоду наступним чином: $\gamma : \{g_{1,i} \le g_{2,i}, K_B\}$, $K_B : \{K_B \in [0;1]; G_1, G_2 \to K_B\}$, де G_1 та G_2 – множини MAC-адрес хостів (групи), що здійснювали повторні DNS-запити в межах TTL-періоду, $G_1 \subseteq H_{j,k}, G_2 \subseteq H_{j,k}$, $g_{1,i} \in G_1, g_{2,i} \in G_2$, K_B – коефіцієнт подібності Браун-Бланке для двох порівнюваних груп; δ – порогове значення подібності. Якщо $\gamma < \delta$, то рядок матриці V_{MAC} для групового запиту $min(G_1, G_2)$ видаляється.

Підпроцес побудови вектора щільності розподілу DNS-запитів в часі та перевірки синхронності запитів визначимо кортежем:

$$P_S = \langle \theta, \varphi, \vartheta \rangle, \quad (10)$$

де θ – процедура побудови вектора щільності розподілу DNS-запитів в часі; φ – функція визначення синхронності DNS-запитів; ϑ – функція об'єднання множин MAC-адрес груп хостів з матриці V_{MAC}.

Групи запитів можна розглядати як синхронні, якщо спостерігається велика кількість запитів для доменного імені в межах певного інтервалу часу, коли боти бот-мережі здійснюють запити – часу синхронізації ботів t_S. З метою перевірки синхронності DNS-запитів використаємо вектор щільності розподілу DNS-запитів в часі. Процедуру побудови вектора щільності розподілу DNS-запитів в часі визначимо кортежем:

$$\theta = \left\langle \chi_{j,k}, \chi_{j,k,i,TS}, t_{first}, t_{last}, t_S \right\rangle, \; j = d_1,...,d_{N_D}, k = \overline{1, N_T}, i = \overline{1, N_{\chi,j,k}}, \quad (11)$$

де t_{first} та t_{last} – час надходження відповідно першого та останнього DNS-відгуків щодо доменного імені в межах TTL-періоду, протягом якого здійснюється пошук групової активності, або було зафіксовано групове очищення локальних кешів DNS.

Вектор щільності розподілу DNS-запитів в часі опишемо наступним чином:

$$\overline{W_d} = (\Omega_j)_{j=1}^{z}, \quad (12)$$

де Ω_j – кількість DNS-запитів в межах z-го інтервалу; $z = (t_{last} - t_{first}) / \frac{1}{3} t_S$.

Функцію визначення синхронності DNS-запитів опишемо кортежем:

$$\varphi = \left\langle \overline{W_d}, \Omega_{max}, \Omega_{max\pm2}, Sum_s, Sum_r, \delta \right\rangle, \quad (13)$$

де Ω_{max} – елемент вектора $\overline{W_d}$ з максимальним значенням, max – його індекс; $\Omega_{max\pm2}$ – елементи вектора, суміжні з Ω_{max}; Sum_s – сума значень максимального та двох суміжних з ним елементів вектора з найбільшими значеннями, які описують розподіл DNS-запитів неперервного інтервалу часу; Sum_r – сума значень решти елементів вектора.

Визначимо функцію φ наступним чином: $\varphi(\overline{W_d}) = true$, якщо $(1-\delta) \cdot Sum_s > Sum_r$, інакше $\varphi(\overline{W_d}) = false$. Якщо $\varphi(\overline{W_d}) = true$, то груповий запит підлягає подальшому аналізу, інакше – відкидається. Такий поділ надає можливість мінімізувати кількість запитів, які не потрапили в інтервал t_S.

Якщо було виявлено повторні групові запити в межах TTL-періоду та $\varphi(\overline{W_d}) = true$ для цих DNS-запитів, множини MAC-адрес груп хостів, що здійснювали повторні запити, об'єднуються. Визначимо функцію об'єднання множин MAC-адрес груп хостів $\vartheta : \bigcup_{j=1}^{q} G_j \to G$, де q – кількість повторних запитів.

Для кожного визначеного інтервалу часу моніторингу t_m будується матриця спостереження M_m (рис. 3, а), де m – номер ітерації спостереження. Якщо було виявлено синхронність DNS-запитів, множини MAC-адрес груп хостів з матриці V_{MAC} переносяться до матриці спостереження M_m. Кожен рядок матриці містить доменне ім'я, запитане групою хостів, MAC-адреси групи хостів, що здійснювали DNS-запити щодо

цього доменного імені, та ознаки наявності для цих груп нетипових для звичайних користувачів особливостей поведінки, властивих для бот-мереж [9].

Представимо матрицю M_m у вигляді набору векторів:

$$\overline{W_{M,i}} = \left(d_i, G_i, N_{G,i}, S_i, F_i, R_i, M_i, N_i\right), i = \overline{1, N_{GQ}}, \quad (14)$$

де $N_{G,i}$ – кількість хостів у групі; S_i – ознака звертання до локальних/нелокальних DNS-серверів; F_i – ознака повторного запиту в межах TTL-періоду; R_i – ознака наявності в DNS-відповідях коду помилки NXDOMAIN; M_i – ознака "інфікований" чи "підозрілий" щодо групи хостів, отримана на проміжних етапах аналізу; N_i – номер ітерації спостереження, на якій зафіксовано ознаку "підозрілий" [9]; N_{GQ} – кількість групових DNS-запитів.

	h_1	h_2	…	h_k	N_0	S	F	R	M	N
d_3	1	1	…	1	5	1	1	0	0	0
d_1	1	0	…	1	4	1	0	0	0	0
d_2	1	0	…	1	6	0.5	0	0	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

а)

	d_3	d_5	d_1	d_2	d_4	…	N_0	S	F	R	M	N
d_3	1					…	4	0	0	1	0	0
d_5	1	1				…	4	0	0	0	0	0
d_1	0.8	0.8	1			…	5	1	1	0	1	0
d_2			0.5	1		…	6	0.5	0	0	0	0
d_4			0.71	0.43	1	…	7	0	0	0	0.5	0

$K_B(G_4,G_1)$	$S_{G4,G1}$	$F_{G4,G1}$	$R_{G4,G1}$	$M_{G4,G1}$
0.71	Suspicious	Suspicious	Neutral	Dangerous

б)

Рис.3. а) Матриця спостереження M_m; б) Матриця мір Браун-Бланке B_m та приклад побудови вектора ознак для двох групових DNS-запитів

Підпроцес побудови матриці спостереження M_m визначимо кортежем:

$$P_M = \left\langle G_i, \chi_j, R_b, \overline{W_{M,i}} \right\rangle, i = \overline{1, N_{GQ}}, j = d_1, \ldots, d_{N_D}, \quad (15)$$

де R_b – множина правил для заповнення комірок матриці M_m [9].

Підпроцес виявлення групової активності шляхом аналізу групових запитів щодо одного й того самого доменного імені опишемо кортежем:

$$P_E = \left\langle \overline{W_{M,i}}, \tau, \varpi, R_S, R_m \right\rangle, i = \overline{1, N_{GQ}}, \quad (16)$$

де τ – функція порівняння груп хостів з матриці спостереження M_m, що запитували однакові доменні імена, з використанням множини правил R_S [9]; ϖ – функція об'єднання рядків матриці M_m на основі множини правил R_m [9].

Визначимо функцію τ наступним чином: $\tau : G_1 \times \ldots \times G_n \to \{inf\ ected, suspicious, not_suspicious\}$, $\tau(G_1, \ldots, G_n) = inf\ ected$, якщо $K_S(G_1, \ldots, G_n) \geq \delta$ або $\delta` \leq K_S(G_1, \ldots, G_n) < \delta$ та $\exists r = true, r \in R_S$; $\tau(G_1, \ldots, G_n) = suspicious$, якщо $\delta` \leq K_S(G_1, \ldots, G_n) < \delta$ та $\forall r = false, r \in R_S$; $\tau(G_1, \ldots, G_n) = not_suspicious$, якщо $K_S(G_1, \ldots, G_n) < \delta`$, де $G_1, \ldots, G_n$ – групи хостів, що запитували однакові доменні імена; $K_S$ – коефіцієнт подібності (коефіцієнт подібності Браун-Бланке для порівняння двох груп або індекс дисперсності Коха для 3 і більше груп); $\delta`$ – порогове значення подібності, за якого групи хостів вважатимуться підозрілими. Якщо $\tau(G_1, \ldots, G_n) = not_suspicious$, то групові запити для доменного імені видаляються з матриці спостереження M_m.

Визначимо функцію ϖ наступним чином: $\varpi : \bigcup_{j=1}^{n} \left\langle G_j, S_j, F_j, R_j \right\rangle \to \langle G, S, F, R \rangle$. Об'єднання значень комірок S, F, R матриці M_m здійснюється за множиною правил R_m [9].

На основі матриці спостереження M_m будується нижньотрикутна матриця мір Браун-Бланке B_m (рис. 3, б). Матриця B_m містить коефіцієнти Браун-Бланке, обчислені для пар груп хостів, що запитували різні доменні імена, та ознаки $N_{G,i}, S_i, F_i, R_i, M_i, N_i$, перенесені з матриці M_m. Матриця B_m формується за зростанням кількості MAC-адрес в групах $N_{G,i}$, по стовпчиках. Обчислення значень комірок для кожного стовпчика припиняється, якщо відношення розмірів порівнюваних груп стане меншим за порогове значення δ'.

Представимо матрицю B_m у вигляді набору векторів:

$$\overline{W_{B,i}} = \left(d_i, K_i, N_{G,i}, S_i, F_i, R_i, M_i, N_i\right), i = \overline{1, N_{GQ}}, \quad (17)$$

де K_i – множина коефіцієнтів Браун-Бланке, обчислених для пар груп хостів, $K_B \geq \delta', K_B \in K_i$.

Підпроцес формування векторів ознак для пар групових DNS-запитів на основі матриці мір Браун-Бланке визначимо кортежем:

$$P_P = \left\langle \overline{W_{B,i}}, R_p, \overline{W_{G_i,G_j}} \right\rangle, i = \overline{1, N_{GQ}}, j = \overline{1, N_{GQ}}, \quad (18)$$

де $\overline{W_{G_i,G_j}}$ – вектор ознак для пари групових DNS-запитів, для яких $K_B \geq \delta`$; $\overline{W_{G_i,G_j}} = \left(K_B\left(G_i,G_j\right), S_{G_i,G_j}, F_{G_i,G_j}, R_{G_i,G_j}, M_{G_i,G_j}\right)$, де $S_{G_i,G_j}, F_{G_i,G_j}, R_{G_i,G_j}, M_{G_i,G_j}$ – зведені поведінкові ознаки для двох груп [9], які можуть приймати наступні значення: "Unusual" (непритаманна ботам), "Neutral" (властива як звичайним користувачам, так і ботам), "Suspicious" (підозріла), "Dangerous" (небезпечна, притаманна ботам); R_p – множина правил для формування векторів ознак [9].

Висновок щодо наявності в мережі групової активності ботів здійснюється на основі аналізу векторів ознак $\overline{W_{G_i,G_j}}$ для пар групових DNS-запитів. Підпроцес аналізу векторів ознак визначимо кортежем:

$$P_A = \left\langle \overline{W_{G_i,G_j}}, f\left(\overline{W_{G_i,G_j}}\right) R_a \right\rangle, i = \overline{1, N_{GQ}}, j = \overline{1, N_{GQ}}, \quad (19)$$

де $f\left(\overline{W_{G_i,G_j}}\right)$ – функція аналізу вектора ознак $\overline{W_{G_i,G_j}}$ на основі множини правил R_a [9], яка може приймати чотири значення: "Not_Infected" (неінфіковані), "Not_Suspicious" (не підозрілі), "Suspicious" (підозрілі), "Infected"(інфіковані).

Одна й та сама група в межах ітерації спостереження може отримати декілька різних оцінок. В такому випадку пріоритет має оцінка з вищим ступенем небезпечності. Групи хостів, які було визначено як не інфіковані, відкидаються. Групи хостів з матриці спостереження M_m, які не потрапили до матриці мір Браун-Бланке B_m, та групи, для яких не було виконано умову $K_B \geq \delta'$, а також групи, визначені як не підозрілі та підозрілі, аналізуються повторно разом з даними, що будуть зібрані на наступній ітерації спостереження (матриця спостереження M_{m+1}) з метою виявлення можливих повторних групових запитів в інтервалі часу t_{m+1}.

Процес виявлення застосування технологій ухилення від виявлення на основі DNS визначимо кортежем:

$$C_{ET} = \left\langle P_T, P_{SW}, P_{DM}, \wp \right\rangle, \quad (20)$$

де P_T – підпроцес аналізу полів TTL вхідних DNS-повідомлень; P_{SW} – підпроцес вилучення ознак, які можуть вказувати на застосування технологій ухилення від виявлення на основі DNS, з вхідних DNS-повідомлень щодо певного доменного імені та побудови вектора ознак; P_{DM} – підпроцес побудови матриці даних на основі векторів ознак для різних доменних імен; $\wp$ – функція здійснення нечіткої кластеризації c-середніх з частковим навчанням.

Підпроцес аналізу полів TTL вхідних DNS-повідомлень з метою відбору DNS-відгуків для подальшого аналізу визначимо кортежем:

$$P_T = \left\langle D, \chi_j, \chi_{j,k}, H_j, \chi_{j,k,i,TS}, \chi_{j,k,i,ANS,TTL} \right\rangle, j = d_1,...,d_{N_D}, k = \overline{1, N_T}, i = \overline{1, N_{\chi,j,k}}. \quad (21)$$

Підпроцес вилучення ознак з вхідних DNS-повідомлень щодо певного доменного імені та побудови вектора ознак визначимо кортежем:

$$P_{SW} = \left\langle D, \chi, \chi_j, \chi_{j,k}, T_{FF}, T_{CM}, T_{DF}, T_{DT}, \overline{W_{ET,j}} \right\rangle, j = d_1,...,d_{N_D}, k = \overline{1, N_T}, \quad (22)$$

де T_{FF}, T_{CM}, T_{DF}, T_{DT} – множини ознак, які можуть вказувати на застосування технологій «швидкозмінних» мереж, періодичної зміни IP-відображення для шкідливого домена, «потік доменів», DNS-тунелювання відповідно; $\overline{W_{ET,j}}$ – вектор ознак вхідних DNS-повідомлень щодо доменного імені.

Множину ознак, які можуть вказувати на застосування технології «швидкозмінних» мереж, визначимо кортежем:

$$T_{FF} = \left\langle T_{mod}, T_{med}, T_{aver}, N_A, S_A, N_{UA}, S_{UA} \right\rangle, \quad (23)$$

де T_{mod} – TTL-період, мода (значення у множині спостережень, яке зустрічається найбільш часто; застосуємо мінімальне значення у випадку, якщо множина є мультимодальною); T_{med} – TTL-період, медіана (значення ознаки, яке розділяє ранжовану сукупність на дві рівні частини, де 50% нижніх одиниць ряду даних мають значення ознаки, не більше, ніж медіана, а 50% верхніх – не менше, ніж медіана); T_{aver} – TTL-період, середнє арифметичне значення; N_A – кількість A-записів, що відповідають доменному імені, у вхідному DNS-повідомленні (ознака використовується, якщо $N_A>1$); S_A – середня дистанція між IP-

адресами в множині А-записів для доменного імені у вхідному DNS-повідомленні (ознака використовується, якщо $N_A>1$); N_{UA}– кількість унікальних IP-адрес в множинах А-записів, що відповідають доменному імені, у вхідних DNS-повідомленнях (ознака використовується, якщо $N_A>1$); S_{UA}– середня дистанція між унікальними IP-адресами в множинах А-записів, що відповідають доменному імені, у вхідних DNS-повідомленнях (ознака використовується, якщо $N_A>1$).

Множину ознак, які можуть вказувати на застосування періодичної зміни IP-відображення для шкідливого домена, визначимо кортежем:

$$T_{CM} = \langle T_{mod}, T_{med}, T_{aver}, N_{IP}, S_{IP} \rangle, \quad (24)$$

де N_{IP} – кількість IP-адрес, пов'язаних з доменним ім'ям (ознака використовується, якщо $N_A=1$); S_{IP} – середня дистанція між IP-адресами, пов'язаними з доменним ім'ям (ознака використовується, якщо $N_A=1$).

Множину ознак, які можуть вказувати на застосування технології «потік доменів», визначимо кортежем:

$$T_{DF} = \langle T_{mod}, T_{med}, T_{aver}, F_S, N_N \rangle, \quad (25)$$

де F_S– бінарна ознака успішності DNS-запиту ($F_S = 0$, якщо DNS-запит невдалий, $F_S = 1$, якщо DNS-запит успішний); N_N – кількість доменних імен, які спільно використовують IP-адресу.

Множину ознак, які можуть вказувати на застосування DNS-тунелювання, визначимо кортежем:

$$T_{DT} = \langle L_N, N_U, E_N, E_R, F_{UR}, L_P, f_{E_B} \rangle, \quad (26)$$

де L_N – довжина доменного імені; N_U – кількість унікальних символів в доменному імені; E_N – ентропія доменного імені; E_R– максимальне значення ентропії ресурсних записів DNS, які містяться в DNS-повідомленнях; F_{UR} – бінарна ознака використання рідковживаних типів записів DNS, або таких, які зазвичай не використовуються клієнтами; L_P – максимальний розмір DNS-повідомлень щодо доменного імені; f_{E_B} – функція залежності ентропії поля DNS-повідомлення від його довжини [11].

Вектор ознак $\overline{W_{ET,j}}$ вхідних DNS-повідомлень щодо доменного імені подамо наступним чином:

$$\overline{W_{ET,j}} = (L_{N,j}, N_{U,j}, E_{N,j}, T_{mod,j}, T_{med,j}, T_{aver,j}, N_{A,j}, N_{IP,j}, S_{IP,j}, S_{A,j}, N_{UA,j}, S_{UA,j}, N_{N,j}, F_{UR,j}, E_{R,j}, L_{P,j}, F_{S,j}), \quad (27)$$
$$j = d_1, \ldots, d_{N_D}.$$

Підпроцес побудови матриці даних на основі векторів ознак визначимо кортежем:

$$P_{DM} = \langle \overline{W_{ET,j}}, V \rangle, \quad (28)$$

де $V = \left(v_{ji}\right)_{j=1,i=1}^{N_D, N_Q}$ – матриця даних, $V(j,) = \overline{W_{ET,j}}$, N_Q – загальна кількість ознак, які можуть вказувати на використання технологій ухилення від виявлення на основі DNS.

Функцію $\wp$ здійснення нечіткої кластеризації с-середніх з частковим навчанням опишемо кортежем:

$$\wp = \langle V, R_e, X, \Psi \rangle, \quad (29)$$

де R_e – множина знань щодо ознак вхідних DNS-повідомлень до ботів, які застосовують технології ухилення від виявлення на основі DNS [10]; $X = \{x_i\}_{i=1}^{N_x}$ – промаркована вибірка даних, яка формується на основі множини знань R_e, для здійснення часткового навчання кластеризатора, N_x – кількість об'єктів в промаркованій вибірці; $\Psi = \{\psi_i\}_{i=1}^{N_\Psi}$ – множина наперед визначених кластерів, N_Ψ – кількість кластерів.

Функція нечіткої кластеризації с-середніх з частковим навчанням може бути визначена як $\wp : V \to \Psi$. Результатом здійснення кластеризації з частковим навчанням є ступені приналежності векторів ознак до п'яти кластерів з множини Ψ. Належність вектора ознак до кластера ψ_1 свідчить про застосування технології ухилення «cycling of IP mapping», ψ_2 – «domain flux», ψ_3 – «fast flux», ψ_4 – «DNS-tunneling», ψ_5 – кластер, який містить нормальні запити.

Процес локалізації хостів, інфікованих ботами, та блокування дій ботів опишемо кортежем:

$$C_L = \left\langle \mathrm{H}, f\left(\overline{W_{G_i}, G_j}\right), \wp, \zeta \right\rangle, i = \overline{1, N_{GQ}}, j = \overline{1, N_{GQ}}, \quad (30)$$

де ζ – множина заходів, які застосовуються до хостів, визначених як інфіковані, з метою ліквідації інфекції (блокування, усунення уразливостей систем, встановлення (оновлення) антивірусного ПЗ тощо).

Висновки

Запропоновано модель інформаційної технології виявлення бот-мереж в мережах на основі аналізу DNS-трафіка. Модель заснована на властивості групової активності ботів в DNS-трафіку та застосовує кластерний аналіз векторів ознак, вилучених з корисного навантаження DNS-повідомлень, які вказують на використання бот-мережами технологій ухилення від виявлення на основі DNS. Також враховуються особливості поведінки груп хостів, властиві бот-мережам.

Запропонована модель є основою методу, який дозволить виявляти ще невідомі боти, а також здійснювати виявлення на початковій стадії поширення інфекції в мережі.

Література

1. The Federal Bureau of Investigation. Demarest, J. (2014, July 15). Statement Before the Senate Judiciary Committee, Subcommittee on Crime and Terrorism, Washington, D.C. Retrieved from http://www.fbi.gov/news/testimony/taking-down-botnets.

2. Detecting Botnet Activities Based on Abnormal DNS traffic. Manasrah, A.M., Hasan, A., Abouabdalla, O. A., Ramadass, S.: International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS), Vol. 6, No.1, 2009. – pp. 97–104.

3. Identifying botnets by capturing group activities in DNS traffic. Choi, H., Lee, H.: Computer Networks, 56, 2012. – pp. 20-33.

4. Botnet Detection Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. Roshna, R.S, Vinodh, E.: International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 3, Issue 2, March-April 2013. – pp.1440-1445.

5. EXPOSURE: Finding Malicious Domains Using Passive DNS Analysis. Bilge, L., Kirda, E., Kruegel, C., Balduzzi, M.: NDSS, 2011– pp. 1-17.

6. Detecting DNS Tunneling. Farnham, G., Atlasis, A.: SANS Institute InfoSec Reading Room, 2013. – pp. 1-32.

7. As the Net Churns: Fast-Flux Botnet Observations. Nazario, J., Holz, T.: In: Conference on Malicious and Unwanted Software (Malware'08), 2008. – pp. 24-31.

8. RFC-1035. Domain names – implementation and specification. Mockapetris, P.: ISI, 1987 (http://www.ietf.org/rfc/rfc1035.txt?number=1035)

9. Pomorova O. A Technique for the Botnet Detection Based on DNS-Traffic Analysis / Oksana Pomorova, Oleg Savenko, Sergii Lysenko, Andrii Kryshchuk and Kira Bobrovnikova // Computer Networks 22th International Conference, CN 2015, Brunow, Poland, June 16-19, 2015. Proceedings, pp.127-138.

10. Lysenko S. DNS-based Anti-evasion Technique for Botnets Detection / Sergii Lysenko, Oksana Pomorova, Oleg Savenko, Andrii Kryshchuk and Kira Bobrovnikova // Proceedings of the 2015 IEEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), IDAAACS'2015, Warsaw, Poland, September 24-26, 2015, Vol.1, pp.453-458.

11. On Botnets that use DNS for Command and Control. Dietrich, C.J., Rossow, C., Freiling, F. C., Bos, H., van Steen, M., Pohlmann, N.: In: Proceedings of European Conference on Computer Network Defense, 2011 – pp. 9-16.

Рецензія/Peer review : 5.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.

УДК 004.75:004.65

В.І. КУНЧЕНКО-ХАРЧЕНКО
Черкаський державний технологічний університет

МЕХАНІЗМ ЛІНГВІСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ЗБЕРЕЖЕНИХ ДАНИХ WWW-РЕСУРСУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦИКЛІВ РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ

З метою формування механізму лінгвістичного аналізу збережених даних www-ресурсу для прогнозування циклів розвитку інтегрованих систем було проаналізовано статистичні показники інтегрованих інформаційних систем. В результаті чого виявлено хвилеподібний порядок розподілу збережених даних www-ресурсу для формування вектору часового ряду. Запропонований механізм реалізації наведеного теоретичного апарату у вигляді семантичної мережі лінгвістичного процесору, що узгоджується з концепцією об'єктно-орієнтованого програмування.

Ключові слова: семантична мережа, лінгвістичний аналіз, прогнозування, інтегрована система, часовий ряд, об'єктно-орієнтоване програмування.

V.I. KUNCHENKO-KHARCHENKO
Cherkassky State Technological University

MECHANISM OF LINGUISTIC ANALYZE SAVED DATA OF WWW RESOURCE FOR THE FORECASTING OF DEVELOPMENTS' CYCLES OF THE INTEGRATED SYSTEMS

Abstract - Was analyzed statistical volumes of the integrated systems for the forming of the mechanism of linguistic analyze of www-resources' saved data for the forecasting of developments' cycles of the integrated systems. As the result was defined the wave-formed order of the distribution of the saved www-resource data. These ones are used for the forming of time series' vector. The proposed mechanism of the theory as the semantic net of the linguistic processor is an accordance of the objective programming conception.

Key words: semantic net, linguistic analyze, forecasting, integrated system, time series, objective programming.

Вступ

На сучасному етапі розвитку суспільства джерела інформації можуть мати різнорідний характер. Використання інформації для побудови точних прогнозів виправдовує отримання рідкісної та достовірної інформації. В практиці часто прагнуть знайти деякі особливі джерела такої інформації, в т.ч. і нелегальні.

Аналіз досліджень за тематикою. З даними джерел [1, 2] біля 90% потрібної, існуючої інформації для прогнозу можна використати із легальних джерел. Різнорідний характер такої інформації наводиться на рис. 1. Потенційно цінним джерелом такої інформації можуть виступати збережені дані www-ресурсу. Для створення прогнозів циклів розвитку інформація повинна бути ефективно відфільтрована, відсортована, та перетворена в часовий ряд визначеного типу вектора чи векторного поля [3].

Формулювання предметної області. На даний момент не існує чіткої концепції експертної системи, алгоритму, що дає змогу отримувати збережені дані www-ресурсів (cookie) для формування часових рядів для систем прогнозування. Складнощі у виборі джерела інформації для процесу планування також виникають через велику їх велику кількість (рис. 1).

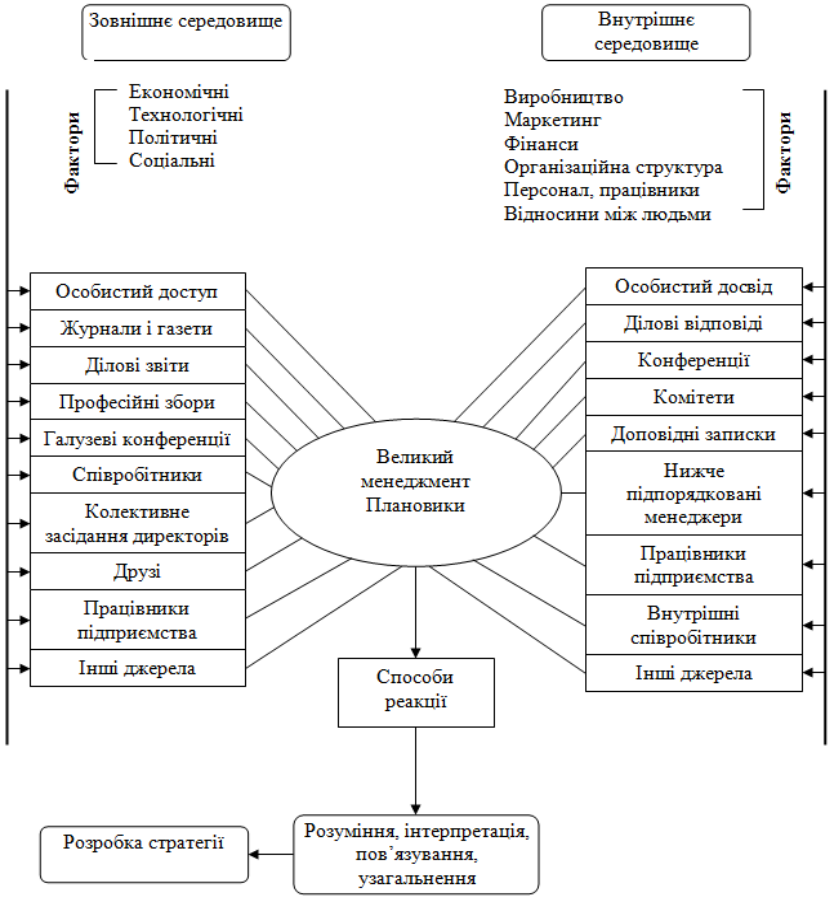


Рис. 1. Джерела інформації для процесу планування

Виклад основного матеріалу. Для з'ясування потенційної практичної цінності та вибору методу формування часового ряду для прогнозування визначимо проаналізуємо статистичні показники даних візитів на сайт інтернет-магазину, отриману через службу Google Analytics [4]. Вибрані для опрацювання дані з даної служби наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Статистичні показники даних візитів на сайт інтернет-магазину Google Analytics

Місяць	Унікальні відвідувачі	Кількість візитів сумарна	Різниця	Повна кількість перегляду сторінок ресурсу	Обсяг спожитого трафіку, Гб
1	2	3	4	5	6
Січень 2010	49260	64900	15640	4929738	29,14
Лютий 2010	102609	150857	48248	11341949	71,39
Березень 2010	120732	181087	60355	13774720	88,87
Квітень 2010	148756	226615	77859	17538939	106,98
Травень 2010	175433	264182	88749	20709849	122,56
Червень 2010	202611	309055	106444	24015381	141,64
Липень 2010	196101	291979	95878	22628495	134,76
Серпень 2010	146925	215512	68587	16558195	99,97
Вересень 2010	110517	161719	51202	12471780	75,69
Жовтень 2010	110487	161767	51280	12149094	74,69
Листопад 2010	134764	198883	64119	15657377	104,43
Грудень 2010	133989	195775	61786	15175711	97,85

В результаті побудови графічних залежностей розподілів унікальних відвідувачів (рис. 2) та сумарної кількості відвідувачів в часі (рис. 3) можна зробити висновок про хвилеподібний характер даних явищ.

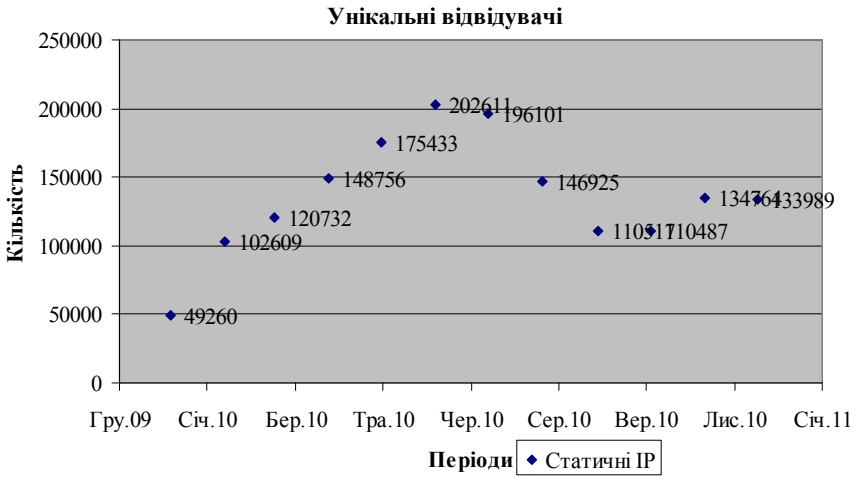


Рис. 2. Графічна залежність розподілів унікальних відвідувачів в часі

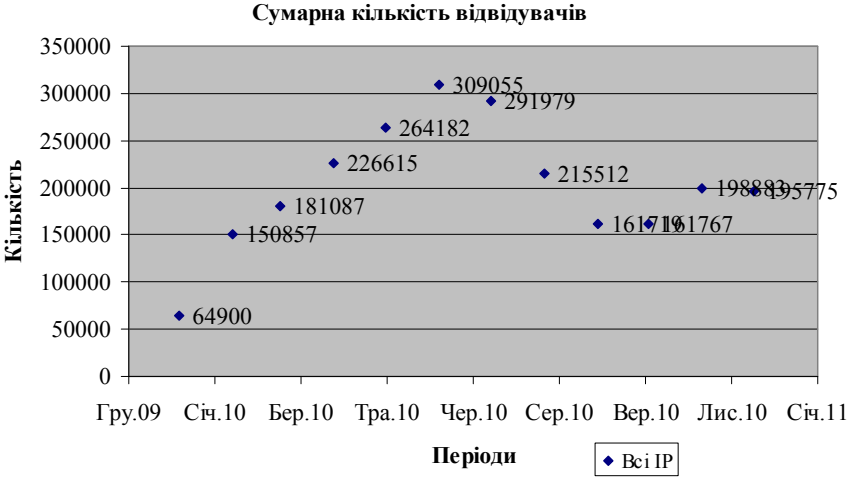


Рис. 3. Кількість візитів сумарна

Можна припустити, що відповідні провали на графіках (рис. 2, 3) є сезонними провалами попиту на

графіках у вихідні, святкові дні. А порівнюючи різницеві дані по місяцям на рис. 4 можна вести мову про можливість виводу корегуючої функції для часового ряду, подібної до наведеної на рис. 4.

Якщо говорити про статистику походження запитів до сайту інтернет-магазину, отриману через Google Analytics [4], то з великою часткою ймовірності загальна кількість відвідувачів сайту перевищує кількість користувачів з унікальними IP-адресами через використання ними протоколу DHCP, відповідно до якої надається IP-адреса для доступу до глобальної мережі робочим станціям на рівні протоколу TCP/IP.

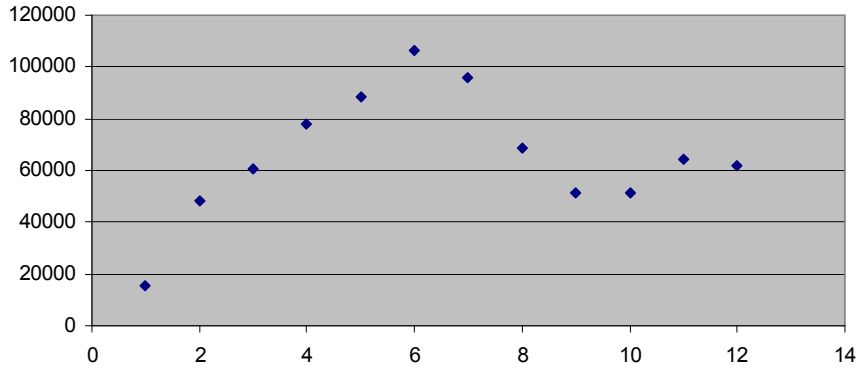
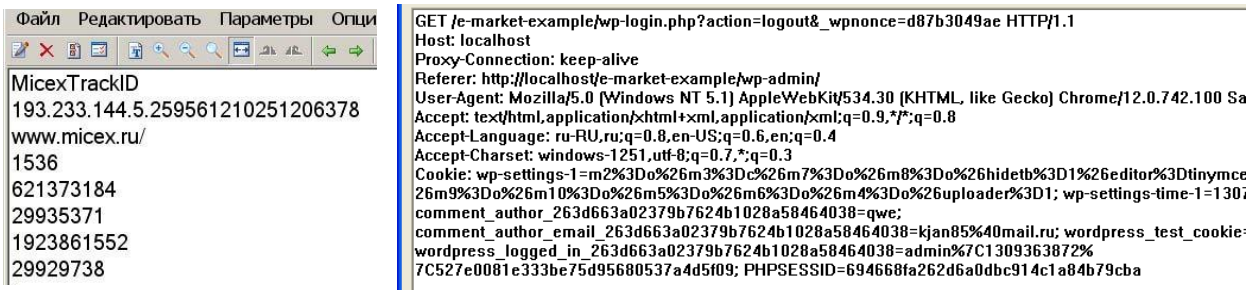


Рис. 4. Різницеві дані кількості відвідувачів

Технологія DHCP дозволяє надавати IP-адреси великій кількості клієнтів в межах декади простору масок адресації сегменту мережі. Верхня і нижня її можливі межі мають значення $\sup IP = XXX.XXX.XXX.255$ і $\inf IP = XXX.XXX.XXX.0$ відповідно [5]. Що може означати той факт, що деякі з користувачів відвідують інтернет-магазин, заходячи з великих сегментів мереж. По точкам графіку рис. 4 можна відновити функціональну залежність, наприклад, за методом Кунченко [6].

Як видно з викладеного вище, використання даних служб Google Analytics дає доволі об'єктивний часовий ряд для подальшого прогнозування, але використання таких служб не завжди доступно, користування службами Google Analytics особливо в розділі комерційної інформації може бути пов'язано зі значними витратами і неможливістю бачити всі отримані дані та деякими іншими причинами. Розв'язок проблеми може критися у використанні збережених даних www-ресурсу (Cookie).

Фактично, cookie – це невеликий обсяг текстової інформації (типу String), яку сервер передає браузеру. Браузер буде зберігати цю інформацію і передавати її серверу з кожним запитом як частину HTTP заголовка. Одні значення cookie можуть зберігатися тільки протягом однієї сесії, вони видаляються після закриття браузера. Інші cookie-файли встановлені на деякий період часу, записуються у файл. Цю властивість механізму роботи з cookie необхідно врахувати при формуванні часового ряду. Зазвичай файл з такою інформацією називається 'cookies.txt' і лежить в робочій директорії встановленого на комп'ютері браузера. Приклад вмісту такого файлу в браузері і сервері наведено на рис. 5а і 5б відповідно.



а **б**

Рис. 5. Приклад вмісту cookie-файлу

Як видно з рис. 5а, 5б, зміст cookie-файлу містить інформацію, яка потенційно може використовуватися для формування часових рядів різного типу даних (String, Integer тощо). По аналогії з традиційними документами, файл збережених даних www-ресурсу для прогнозування циклів розвитку інтегрованих систем може бути розкладений на семантичні елементи у відповідності до кодів реквізитів згідно з уніфікованою системою організаційно-розпорядчих документів (УСОРД) [7], а далі оброблений за допомогою ЛП. Підготовка даних, збережених в такому файлі вимагає створення класу ЛП, що орієнтовані на обробку текстів характерної мови, що зберігаються в базі cookie-файлів, а саме: інформаційних блоків IP-адрес; URL, URI посилань; заголовків та ключів форматованих web-ресурсів тощо.

Семантична мережа ЛП формується на основі обробленої інформації структуру бази знань (БЗ). ЛП виділяє з текстів семантично значущу складову. У текстах cookie-файлів ЛП повинен виділяти тільки ту інформацію, яка необхідна для побудови прогнозу і подальшої автоматичної побудови рішень. Наприклад, це можуть бути конкретні посадові особи, назви організацій, якісні характеристики товарів, послуг, локація, ціна.

Як зазначено в [8], ЛП забезпечує автоматичну побудову змістовних образів. Він включає в себе елементи лексикографічного, морфологічного, термінологічного і семантико-синтаксичного аналізу та апарат формування алфавіту.

Блок лексикографічного аналізу ЛП забезпечує: 1) автоматичний поділ тексту на самостійні частини (наприклад, виділення документів із загального обсягу інформаційного потоку); 2) визначення початку та кінця тексту; 3) автоматичне визначення цифрових блоків та блоків службових символів у тексті.

При морфологічному аналізі кожному слову надаються ознаки, які діляться на три групи 1) лексичні (слово з великої літери, з точкою на кінці або це окрема буква та ін.); 2) морфологічні (граматична категорія слова: рід, число, відмінок, відміна для іменника); 3) семантичні (прізвище, ім'я та по батькові) [9, 10].

Кількість семантичних ознак може збільшитися як за рахунок спеціальних словників – словників полів кодів реквізитів документів, специфічних кваліфікаційних ознак тощо [10]. Саме слово в нормальній формі також вважається ознакою. Блок морфологічного аналізу заснований на узагальнених закінченнях слів Результатом роботи блоку морфологічного аналізу є семантична мережа, що є ієрархічною просторовою структурою тексту документа (рис. 6) та оброблює початковий текст (алфавіт).

У такій структурі (рис. 6) наведені слова в нормальній формі з їх ознаками та вказуванням їх послідовності. Подальша обробка зводиться до перетворення мереж на основі заданих правил. Для виділення необхідного інформаційного векторного потоку достатньо знайти в семантичній мережі для ЛП цифрові або текстові результати, що відповідають шуканому параметру часового ряду, передати їх експертній системі для з'ясовування рівня пошукового шуму, знаходження рівня оптимальності критеріям релевантності. Цьому передує термінологічний аналіз.

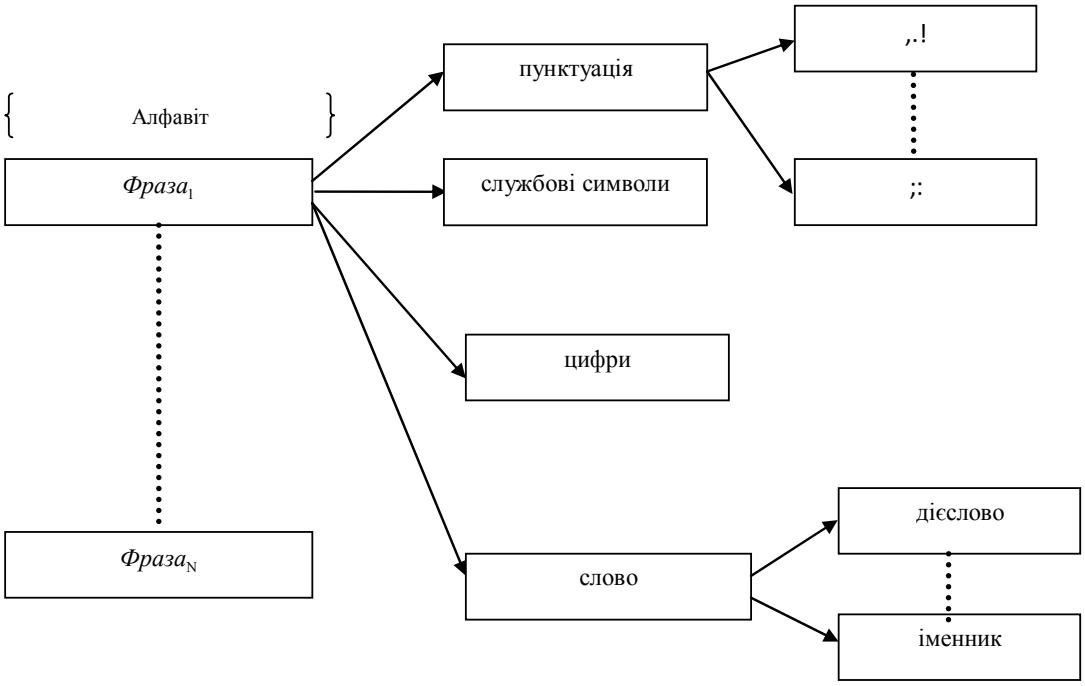


Рис. 6. Семантична мережа для ЛП

Синтаксичний аналізатор синтезується на базі кінцевого автомату (КА). В даному випадку використовується уявлення мови, що аналізується у вигляді деякого виду КА .

Реалізація викладеного в статті механізму, здійснена на базі об'єктно-орієнтованої ООП J2SE 7.0.

В якості частини реалізації обробника потоку даних, використано J2SE CookieHandler з набором відповідних методів. Даний клас дозволяє керувати станом системи за допомогою cookie. По закінчення сесії з'єднання cookie-файли передаються до БД. Де зберігаються до моменту початку опрацювання їх ЛП.

Для роботи з ЛП засобами ООП Java створено новий клас StringLP, наведений нижче:

```
public class StringLP {
  public static TCDB (String str, int a, String sa, int b, String sb, String
sc, int c, String sd, int d ){
    //------Код методу ===============
  }
}
```

Для нього об'явлено статичний метод TCBD в якому наявні девять аргументів, які відповідають чотирьом блокам виділення морфем семантичною мережею (рис.6):

1) str – вихідний рядок;

2) a – номер входження першого підрядка;
3) sa – перший підрядок;
4) b – індекс входження другого підрядка;
5) sb – другий підрядок;
6) c – індекс входження третього підрядка;
7) sc – третій підрядок;
8) d – індекс входження четвертого підрядка;
9) sd – четвертий підрядок.

Клас String в Java призначений для зберігання рядків. Створити екземпляр класу можливо простим присвоюванням: String str=”string”. Даний метод є статичним, для його виклику не потрібно створювати екземпляр класу. Змінна result – кінцевий результат, який повертає клас StringLP.

Висновки. В результаті проведеної роботи з формування механізму лінгвістичного аналізу збережених даних www-ресурсу для прогнозування циклів розвитку інтегрованих систем проаналізовано статистичні показники інформаційних систем та з’ясовано хвилеподібний порядок розподілу статистичних даних для формування вектору часового ряду. Створена семантична мережа дозволяє виділяти специфічний алфавіт з бази знань збережених даних www-ресурсу. В результаті, механізм реалізації наведеного теоретичного апарату здійснено в рамках концепції ООП Java. В рамках подальших досліджень потребує розв’язку задача відновлення аналітичного виразу функціональної залежності різницевих даних (рис. 4) та побудова експертної системи. На базі методу визначення схожості повних текстів статистичної міри tf-idf, описаному в [15] може бути здійснена онтологічна формалізація отриманих часових рядів та їх сортування для підвищення точності прогнозів.

Література

1. Кунченко-Харченко В.І. Інформаційно-системні технології, архівознавство і документологія для прогнозу циклів розвитку соціальних та виробничих систем / В.І. Кунченко-Харченко. – Львів : УАД, 2009. – 300 с.

2. Макаров А.М. Маркетинг : учебное пособие / А.М. Макаров. – Ижевск : Изд-во Института экономики и управления УдГУ, 2000. – 222 с.

3. Abderrahman Atmani. A fuzzy expert system for automatic seismic signal classification / Abderrahman Atmani, El Hassan Ait Laasri, Es-Said Akhouayri, Dris Agliz, Daniele Zonta // Expert Systems with Applications. Volume 42, Issue 3, 15 February 2015, Pages 1013–1027.

4. Анализ работы сайта Интернет-магазина с помощью Google Analytics [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.emagazin.info/ru/google_analytics_shop - 30.11.2015.

5. DHCP Primer [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.esubnet.com/fragment-dhcp-primer.html. – 01.11.2015.

6. Кунченко Ю.П. Поліноми наближення у просторі з породжувальним елементом / Ю.П. Кунченко ; пер. з рос. – К. : Наукова думка, 2005. – 219 с.

7. Державна уніфікована система документації. Уніфікована система організаційно-розпорядчої документації. Вимоги до оформлення документів. ДСТУ 4163-2003 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.gerelo.dp.ua/index/info_dstu_4163-2003.html.

8. Сікора Л. С. Логіко когнітивна структура операційних стадій розв’язання задач управління ПНО / Л. С. Сікора, Р. Л. Ткачук, Т. Є. Рак, В. І. Кунченко-Харченко // Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – К., 2013. – Вип. 67. – С. 148–157.

9. Кузнецов И.П. Семантико-ориентированные системы на основе баз знаний : монография / И.П. Кузнецов, А.Г. Мацкевич. – М. : МТУСИ, 2007. – 173 с.

10. Кузнецов И.П. Семантико-ориентированный лингвистический процессор для автоматической формализации автобиографических данних / И.П. Кузнецов, А.Г. Мацкевич // Труды международной конференции "Диалог 2006". – Бекасово, 2006. – С. 317–322.

11. Hlava M. Multilingual machine indexing / Hlava M., Hainebach R. // Proceedings of the Ninth international conference on new information technology, Pretoria, South Africa, november 11–14, 1996. – P. 105–120.

12. Beuster G. MIC – A System for Classification of Structured and Unstructured Texts. Diploma Thesis. – University Koblenz, 2001.

13. Berners-Lee T. Spinning the Semantic Web: Bringing the World Wide Web to Its Full Potential / T. Berners-Lee. The MI Press, 2005.

14. Steinberger R. using thesauri for automatic indexing and visualisation / Steinberger R., Hagman J., Scheer St. // OntoLex, 2000. – 2000. – pp. 130–141.

15. Гранік М.О. Метод визначення схожості новинних текстів на основі статистичної міри «term-inverce document frequency» / М.О. Гранік, В.І. Месюра // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 4. – С. 180–182.

Рецензія/Peer review : 21.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Лега Ю.Г.

УДК 004.891

О.В. КЛІЩ, О.В. ОГНЄВИЙ
Хмельницький Національний університет

МЕТОД ВІДСЛІДКОВУВАННЯ МОБІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЗА ПЕРЕХОПЛЕНИМИ «ПРОБНИМИ» ПАКЕТАМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО WIFI

На сьогоднішній день майже у кожного є пристрої із вбудованим WiFi модулем, для можливості підключення до бездротових мереж. Більшість із нас за день підключається до кількох бездротових мереж: вдома, на роботі, в кафе і т.д. У даній статті ми звернемо увагу на принципи утворення WiFi з'єднання між точкою доступу (роутером) та портативним пристроєм, розглянемо відмінності підключення різних пристроїв, а також типи «пробних» пакетів. На основі проведених досліджень було вибрано найбільш прості та доступні ресурси для вирішення поставлених завдань, розглянути недоліки і переваги створюваного методу, а також перспективи його доопрацювання та застосування.

Ключові слова: WiFi, точка доступу, пакет, відслідковування.

O.V. KLISHCH, O.V. OHNIEVYI
Khmelnitsky National University

METHOD OF TRACKING MOBILE DEVICE BY INTERCEPTED "TRIAL" FRAMES OF CONNECT TO WIFI

Abstract - Aim of the article is a justification of this method of trackin, its differences and Aim of the article is a study on this method of tracking its differences and features, compared to other methods of tracking. Nowadays almost everyone has a device with built-in WiFi module for connectivity options to wireless networks. Most of us during the day connects to some wireless networks: at home, at work, in cafes, etc. In this article we turn our attention to principles of creating Wi Fi connection between the access point (router) and portable device , consider the differences between various connection devices and the types of "test" packages.

Based on conducted research was chosen the most simple and available resources to solve the assigned tasks, consider the advantages and disadvantages of created method and perspectives of its improvement and use.

Key words: Wi-Fi, access point, package, tracking.

Постановка задачі

Існує декілька основних способів визначення місцезнаходження пристрою:

- За унікальним номером IMEI. Проте здійснити це дуже важко, оскільки для цього потрібно звернутися до оператора мобільного зв'язку, і таку інформацію фізичним особам не надають.
- За допомогою технології GPS, але дану технологію підтримують далеко не всі портативні девайси і вона потребує додаткового ПЗ або налаштувань на шуканому пристрої.
- Існують також спеціальні додатки для знаходження загубленого пристрою, деякі з них обіцяють застосування кількох різних методів.

Проте жоден з них не можна повноцінно порівняти із описаним мною методом. Оскільки кінцевим результатом нашого методу буде історія підключень пристрої, а звідси й історія місцезнаходження пристрою. А найголовніше, що для цього нам не потрібно встановлювати жодного додаткового ПЗ на пристрій, і не обов'язково бути його власником.

Виклад основного матеріалу досліджень

Технологія Wi-Fi цікава в концепції тим, що одна базова станція мережі системи Wi-Fi може дати доступ десяткам абонентів відразу, причому з досить більшими швидкостями. Мінімальні вкладення і простота реалізації роблять Wi-Fi цікавою та широкозастосованою технологією.

Той факт, що у всіх сучасних портативних девайсах реалізовані функції Wi-Fi, полегшує застосування цієї технології в публічних місцях. Більшість користувачів за день підключаються до кількох точок доступу: вдома, на роботі, в кафе і т.д. Отож завданням данного методу є визначення точок доступу до якмх підключався користувач, та визначення їх місцеположення. Існують й інші методи відслідковування місцеположення девайсу, та наше завдання здобути якомога більший список мереж, до яких користувач підключався, для отримання більшого об'єму інформації про власника девайсу.

Важливо відзначити, що користувацькі пристрої можуть працювати в двох режимах пошуку мережі [2,ст.37]:

1. Режим Пасивного сканування (Passive Scanning) - досить повільний режим, тому користувацький пристрій повинен послідовно прослуховувати всі частотні канали підтримуваного діапазону в надії виявити бікони (Beacon Frames). Ці пакети розсилають роутери, щоб оголосити про свою присутність[3]. Клієнт знаходить вже відому йому мережу і з'єднується з нею. Такий режим, зазвичай, використовують ноутбуки та інші пристрої, які не є смартфонами.

2. Режим Активного сканування (Active Scanning) - активно відсилаються запити в ефір. Пристрій посилає фрейми типу Probe Request по всіх частотних каналах в підтримуваному діапазоні часто із зазначенням шуканого SSID мережі (direct probe request) або без SSID (null probe request). Активне сканування значно підвищує динаміку роботи з мережею і допомагає у вирішенні таких завдань, як, наприклад, забезпечення швидкого роумінгу і т.п., але і створює деяке додаткове навантаження на мережу.

Взагалі стандарт 802.11 визначає три типи фреймів:

1. Фрейми Управління (Management frames).

Фрейми управління 802.11 дозволяють встановлювати і підтримувати комунікації в мережі стандарту WiFi.

Всього стандарт 802.11 визначає 14 типів фреймів управління:

1. Association request,
2. Association response,
3. Reassociation request,
4. Reassociation response,
5. Probe request,
6. Probe response,
7. Beacon,
8. ATIM (Announcement traffica indication mesage),
9. Disassiciation,
10. Authentication,
11. Deauthentication,
12. Action,
13. Action No Ack,
14. Timing advertisement.

2. Фрейми Контролю (Control frames).

Фрейми контролю 802.11 допомагають у доставці фреймів даних між станціями і точками доступу. Всього стандарт 802.11 визначає 9 типів фреймів контролю:

1. PS-Poll (Power Save Poll),
2. RTS (Request to Send),
3. CTS (Clear to Send),
4. ACK (Acknolegement),
5. CF-End (Contention Free-End),
6. CF-End + CF-ACK,
7. Block ACK Request (BlockAckReq),
8. Block ACK (BlockAck),
9. Control wrapper.

3. Фрейми Даних (Data frames).

Природно основне завдання мережі стандарту WiFi це передача даних. Фрейми Даних переносять пакети вищерозташованих рівнів, таких як веб-сторінки і т.п. всередині тіла самого фрейму. Якщо переглянути фрейми 802.11 через аналізатор пакетів, то можна розглянути контент тіла фрейма і побачити які пакети даних знаходяться всередині фрейму даних при транспортуванні.

Стандарт WiFi IEEE 802.11 визначає 15 типів фреймів даних:

1. Data frame (простий фрейм даних).

Простий фрейм даних це найбільш поширений тип фреймів даних.

2. Null function (фрейм спеціальної нульової функції),
3. Data + CF-ACK (PCF only),
4. Data + CF Poll (PCF only),
5. Data + CF-ACK + CF-Poll (PCF only),
6. CF-ACK (без данных) (PCF only),
7. CF-Poll (без данных) (PCF only),
8. CF-ACK + CF-Poll (без данных) (PCF only),
9. QoS Data (HCF),
10. QoS Null (без данных) (HCF),
11. QoS Data + CF-ACK (HCF),
12. QoS Data + CF-Poll (HCF),
13. QoS Data + CF-ACK + CF-Poll (HCF),
14. QoS CF-Poll (без данных) (HCF),
15. QoS CF-ACK + CF-Poll (без данных) (HCF).

Кожен фрейм має контрольне поле, яке визначає версію протоколу 802.11, тип фрейму і різні індикатори, як наприклад: WPA включений, управління енергозбереженням активно і т.п.. Додатково до цього всі фрейми містять MAC-адреси джерела й одержувача, номер фрейму в послідовності, тіло фрейму і перевірочну послідовність фрейму для корекції помилок. Фрейми 802.11 переносять протоколи та дані більш високих рівнів моделі OSI / ISO всередині тіла фрейму. Наприклад фрейм даних може транспортувати HTML-код будь-якої веб-сторінки (з усіма необхідними заголовками TCP / IP), використовувані далі для відображення. Інші фрейми, які станції використовують для управління і контролю, несуть специфічну інформацію про бездротове з'єднання в тілі фрейму. Наприклад, тіло фрейму-бікона містить ідентифікатор мережі WLAN: SSID, тимчасові відмітки (timestamp) та іншу інформацію про точку доступу.

Beacon frame (Фрейм Бікон) - це один з найбільш важливих фреймів керування. Точка доступу WiFi періодично відправляє їх для анонсування своєї присутності та надання необхідної інформації (SSID, частотний канал, тимчасові маркери для синхронізації пристроїв за часом, підтримувані швидкості, можливості забезпечення QoS і т.п.) всіх пристроїв в зоні її покриття. Радіокарти користувацьких пристроїв періодично сканують всі канали 802.11 і слухають бікони, як основу для вибору кращої точки доступу для асоціації. Користувацькі пристрої зазвичай не розсилають бікони, за винятком ситуації, коли виконується процедура участі в IBSS (Independent Basic Service Set) або, по іншому, в одноранговому з'єднанні типу Ad-hoc.

Probe request frame (Фрейм-запит Проба) - мобільні пристрої з WiFi відправляють фрейми-запити проби, щоб отримати інформацію від іншого пристрою. Наприклад, радіокарта мобільного пристрою відправляє Проби-запити, щоб визначити які точки доступу знаходяться в зоні покриття.

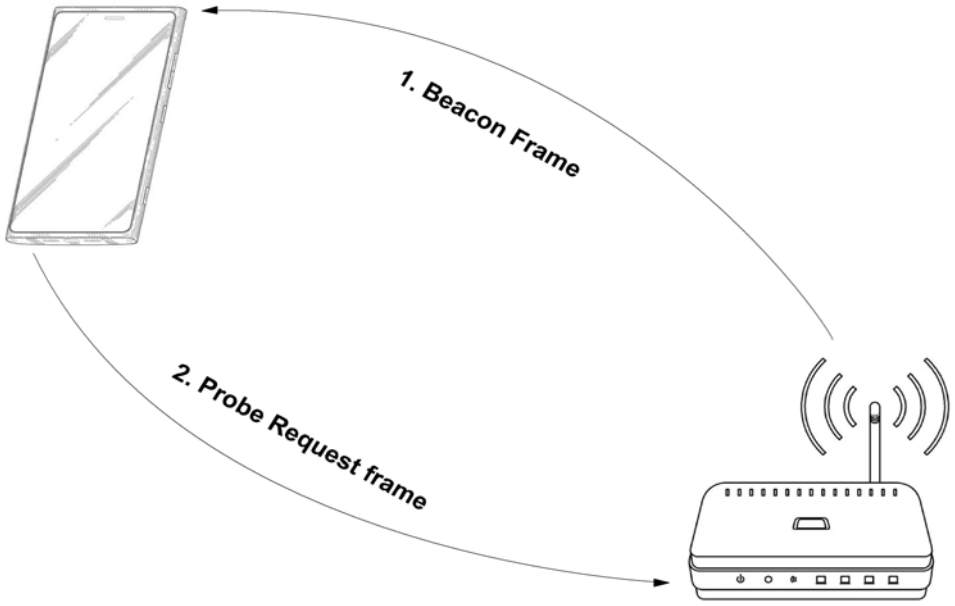


Рис. 1. Схема обміну пакетами пристрою і точки доступу

Нас цікавить Probe request frame, оскільки прочитавши саме його ми отримаємо необхідну нам інформацію, а саме - ім'я мережі та mac-адресу пристрою. Важливо, що Probe Rerquest frame містить не лише ім'я мережі до якою намагається підключитись в даний момент, а й список мереж до яких він підключався раніше. Саме на основі цього списку ми і зможемо дослідити історію підключень пристою. Ім'я мережі, в процесі дослідження, розкаже нам про розташування точки доступу. Отже ми зможемо перенести дані на карту, і отримати історію місце розташування пристрою з точністю до будівлі. А mac-адреса [4, с.30] пристрою дозволить нам дізнатись модель пристрою, що допоможе віднайти його власника в натовпі.

Висновки

Зроблені висновки про доцільність використання даного методу відслідковування мобільного пристрою. Проведений аналіз дозволив зробити висновки про доцільність використання цього методу для отримання додаткової інформації про переміщення пристрою і його власника.

Запропонований підхід дозволить швидко отримати важливу інформацію без контакту з пристроєм і додаткових дозволів.

Література

1. Wi-Fi. (Вікіпедія — вільна енциклопедія) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: https://uk.wikipedia.org/wiki/За[ист_у_мережах_Wi-Fi.

2. Джон Росс. Wi-Fi. Беспроводная сеть / Джон Росс ; пер. с анг. В. А. Ветлужских. – Москва: НТ Пресс, 2007. – 320 с.

3. Захист у мережах Wi-Fi. (Вікіпедія — вільна енциклопедія) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: https://uk.wikipedia.org/wiki/Захист_у_мережах_Wi-Fi.

4. Щербаков А. К. Wi-Fi: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить / Щербаков А. К.; - Москва: ЛА «Бук-Пресс», 2005. - 352 с.

Рецензія/Peer review : 27.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф., Мясіщєв О.А.

УДК 004.891

С. Г. ОЖАРОВСЬКИЙ, О. А. МЯСІЩЄВ
Хмельницький Національний університет

МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ, ПО КОРОТКОМУ СЛОВНИКУ, З ВИКОРИСТАННЯМ MEL-КЕПСТРАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

В статті розглядається розпізнавання мовлення, а саме використання цієї технології для андроїд пристроїв. Так як вони є дуже розповсюдженими, постає задача створити голосовий інтерфейс, для більшої збільшення зручності у їх використанні. Головною ідеєю є - створення додатку, який буде виконувати розпізнавання не на сервісі, як зазвичай це відбувається, а на самому пристрої, за допомогою відкритої технології розпізнавання мовлення Pocketsphinx. Ця технологія мультиплатформена, що дозволяє скомпілювати її в бібліотеку під ARM процесор, за допомогою Android NDK.

В ній використовується обмежений словник вимови та граматика запитів, що дозволяє підвищити точність розпізнавання саме для конкретного набору слів і зробити це прямо на пристрої, без підключення до мережі.

Ключові слова: розпізнавання, короткий словник, Pocketsphinx , андроїд.

S. OZHAROVSKIY, A. MYASISCHEV
Khmelnitsky National University

SPEECH RECOGNITION METHOD, IN BRIEF DICTIONARIES, WITH MEL-CEPSTRAL COEFFICIENTS

In the paper the speech recognition, namely the use of this technology for android devices. Since they are very common, there is the problem of a voice interface for greater ease of increasing their use. The main idea is - to create applications that will not perform recognition on service, as usually happens, and on the device itself, using speech recognition technology open Pocketsphinx. multiplatform This technology, which allows it to compile the library under the ARM processor, using the Android NDK.

It uses a limited vocabulary and grammar pronunciation queries that can improve the accuracy of recognition is for a particular set of words and do it right on your device without connecting to the network.

Key words: recognition, brief dictionary, Pocketsphinx, android.

Постановка задачі

Створення інтерфейсів, які підтримують та надають більш природні форми діалогу між користувачем та андроїд пристроєм, рухається та прискорюється впровадженням інформаційних технологій в слід за зростаючими потребами професійної та повсякденної діяльності людини. В області інформаційних технологій засоби взаємодії користувача з технічною системою називають інтерфейсом. Інтерфейси бувають різні і реалізуються різними засобами та методами. Одною з найважливіших задач розробки сучасних технічних систем є забезпечення найбільш інтуїтивного і природного інтерфейсу з користувачем, тобто сучасні андроїд додатки орієнтовані на користувача.

Одною з природних форм взаємодії для людини є мовлення. Голосовий інтерфейс може покращити існуючий користувальницький інтерфейс – він забезпечує більш зручний та менш обмежений спосіб взаємодії людини з пристроєм. Якісний голосовий інтерфейс допомагає подолати несприйняття технології користувачами, так як для його використання не потрібно опановувати нові навички. Голосовий інтерфейс якісним чином змінює спосіб, а отже і ефективність взаємодії користувача з системою. Голосовий пошук від компанії Google та голосовий асистент Siri від компанії Apple є яскравими прикладами цьому, які підтверджують існуючу необхідність впровадження мовленнєвих технологій, зокрема розпізнавання мовлення та голосових інтерфейсів.

Важливий та практичний аспект даних проблем зв’язані з тим, що голосовий інтерфейс є необхідною складовою, коли мова йде про створення комфортних умов життя для людей з порушенням опорно-рухового апарату, а також спеціалістів які втратили можливість використання стандартних засобів в результаті професійного захворювання або травми. Такі системи з часом увійдуть в повсякденний побут в процесі реалізації концепції «розумних будинків».

В зв’язку з вищесказаним стає актуальною проблема можливості створення простого голосового інтерфейсу для користувачів андроїд пристроїв, враховуючи неможливість миттєвого переходу і необхідність адаптації до нових інструментів та засобів, очевидною стає проблема в інтеграції з вже існуючими системами.

Далеко не всі задачі розробки голосового інтерфейсу на даний час можна вважати вирішеними. Проблема розробки голосового інтерфейсу є достатньо складною та комплексною, що потребує від розробника знань в різних предметних областях, таких як комп’ютерні науки, лінгвістика і психологія поведінки людини. Навіть при наявності сучасних засобів проектування, розробка ефективного користувальницького інтерфейсу потребує від його творців детального розуміння як задач, виконуваних системою, так і психологію користувачів системою.

Проведений бібліографічний пошук та аналіз інформації в Internet підтвердив актуальність теми тим, що в даний час багато провідних компаній посилюють роботу в напрямку розвитку голосових інтерфейсів і технології розпізнавання мовлення. Впровадження голосового інтерфейсу залишить очі та руки користувача вільними від перевантаження, що підвищить надійність та якість управління.

Використання мовного діалогу в системах масового обслуговування також актуальне[1]. Крім виключної зручності для населення, такі системи підвищують комерційну вигоду за рахунок залучення додаткових клієнтів.

Виклад основного матеріалу досліджень

Переваги голосового інтерфейсу:

- Оперативність та природність;
- Мінімум спеціальної підготовки користувача;
- Можливість користування пристроєм в темряві, за межами його візуальної видимості;
- Можливість використання одночасно ручного та голосового введення інформації;

До основних класів задач голосового інтерфейсу слід віднести:

- Синтез мовлення – ця задача включає в себе комплекс підзадач і полягає в перетворенні друкарського тексту у мовний сигнал;
- Аналіз та розпізнавання мовлення – комплекс задач, які включають в себе запис, оцифрування і аналіз мовлення для розпізнавання отриманого мовного сигналу системою;
- Розуміння (інтерпретація) мовлення – це комплекс задач, зв'язаних з аналізом змісту мовленнєвих повідомлень і формування реакції (відповіді) системи.

Загальна структура голосового інтерфейсу включає два основних компоненти:

- Синтез мовлення;
- Розпізнавання мовлення.

Кожна з задач голосового інтерфейсу є достатньо складною, відповідно вказаним компонентам виділяють два класи систем:

- Системи синтезу мовлення;
- Системи розпізнавання мовлення.

Реалізація мовленнєвого діалогу відбувається за допомогою діалогу, в якому запит і відповідь зі сторони користувача ведеться на мові, близькій до природньої. Користувач вільно формує задачу, але з набором встановлених програмним середовищем слів. Різновидністю інтерактивного природнього діалогу є мовленнєве спілкування з андроїд системою. В цьому випадку людський голос може перетворюватись, наприклад, в текст, або використовуватись для інтерактивного управління системою, або для ідентифікації особи. В основі даних процесів лежить технологія і вирішення задачі розпізнавання мовлення.

Мовлення в фізичному сенсі – це акустичний сигнал, генерований артикуляційними органами людини, який передається через фізичне середовище, та сприймається вухом людини. При природній або штучній генерації мовлення в акустичному сигналі змінюються фізичні параметри. Ці зміни діють на мембрану вуха, створюють траєкторії звукових образів, зрозумілих для людини як відповідні звуки даної мови, або інакше кажучи, при вимові слів людина генерує звуки (фонеми), які несуть інформацію про ті символи, за допомогою яких ці слова можуть бути записані у вигляді тексту.

Математичну модель генерації звуку можна представити у вигляді збуджуючих генераторів тонового і білого шуму, групи резонаторів, модуляторів і ключів (рот, ніс, язик губи), які забезпечують формування відчуття відповідного звуку.

Системи розпізнавання мовлення – це системи, які аналізують акустичний сигнал алгоритмами, заснованих на різних теоріях, передбачаючих, які характеристики мовленнєвого сигналу створюють відчуття звуків даної мови, і математичних методах, які з тою чи іншою точністю виділяють значущі параметри акустичного сигналу і перетворюють його в різній повноті в необхідну форму.

Завчасно формується база фонем мови, яка містить шаблони базового набору слів за «усередненої» мови, тобто незалежній від диктора. Мовлення переводиться в фонемний опис і надходить у файл опису фонем, звідки цей опис надходить в блок розпізнавання, де проводиться порівняння інформації яка надійшла з тією, яка зберігається в базі. Формується розпізнавання слова, яке перетворюється в текстові дані або команду.

Системи розпізнавання мовлення складаються з двох частин – акустичної та лінгвістичної. В загальному випадку можуть включати в себе фонотечну, фонологічну, морфологічну, лексичну, синтаксичну і семантичну моделі мови.

Акустична – відповідає за представлення мовленнєвого сигналу, за його перетворення в деяку форму, в якій в більш явному вигляді присутня інформація в змісті мовленнєвого повідомлення.

Лінгвістична – інтерпретує інформацію, отриману від акустичної моделі, і відповідає за представлення результатів розпізнавання користувачу.

Задачі розпізнавання мовлення – автоматичне відновлення тексту вимовлених людиною слів, фраз або пропозицій на природній мові і проблеми ідентифікації, шумоочистки, розпізнавання мов, оцінка психофізичного стану людини. При вирішені задачі розпізнавання злитого мовлення людина застосовує свої знання про природне мовлення, а також зміст сказаного усунення неоднозначності при встановлені тексту речення.

Методи розпізнавання мовлення можна розділити на дві великі групи: непараметричні – з використанням непараметричних мір близькості до еталону, і параметричні (імовірнісні) – на основі методу прихованих моделей Маркова, нейромережні[2], [3] .

Параметричні методи застосовуються для розпізнавання мовлення в наш час, були вперше

запропоновані американськими вченими (Бейкер[4] і Джелинек[5]) в 1970 роки минулого століття. В них використовується теорія прихованих моделей Маркова – двічі стохастичні процеси і ланцюги Маркова[6] по переходах між станами і множинами стаціонарних процесів в кожному станові ланцюга.

Перевагами методу прихованих моделей Маркова є:

- Швидкий спосіб розрахунку значень функції відстані(імовірності);
- Значно менший обсяг пам'яті, в порівнянні з методом «динамічної деформації часу», необхідний для зберігання еталонів команд.

Основний недолік - це важкість його реалізації.

В нашому випадку розпізнаватись буде визначений набір команд, для цієї задачі найкраще підходить розпізнавання на основі обмеженого словника та граматики запитів. Це дозволить підвищити точність розпізнавання саме для конкретного набору слів та здійснювати це прямо на пристрої, без підключення до мережі. Було вирішено використовувати відкриту технологію розпізнавання мовлення Pocketsphinx.

Pocketsphinx - система розпізнавання злитої промови - розробляється інженерами з Університету Карнегі-Мелон і компілюється в бібліотеку під ARM за допомогою Android NDK. При цьому можна згенерувати JNI-обгортки для використання нативних методів з коду на Java.

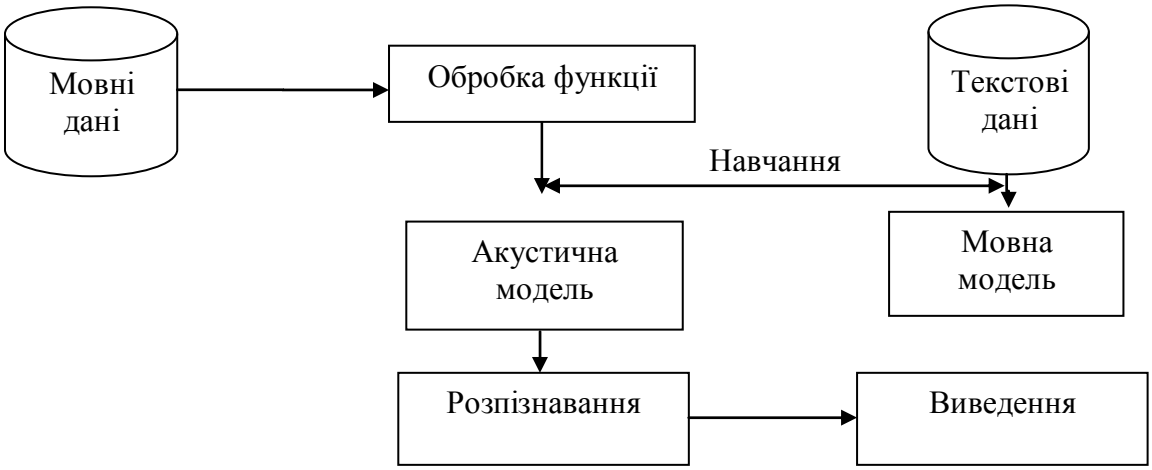


Рис. 1. Схема роботи Pocketsphinx

Поклавши скомпільовану бібліотеку в libs / armeabi проекту, можна потім завантажити її з коду таким чином:

```
static {
    System.loadLibrary("pocketsphinx_jni");
}
```

Основними класами для ініціалізації та роботи з розпізнаванням мови є Config і Decoder. З допомогою першого вказуються параметри розпізнавання, а також повні шляхи до мовної моделі, словника вимов і файлу граматики запитів у форматі JSGF (Java Speech Grammar Format). Decoder надає конструктор, що приймає в якості аргументу цю конфігурацію, і ініціалізує власне інтерфейс для розпізнавання мови.

Для цього можна скористатися методами startUp, process Raw, gitHub і endUtt. Перший і останній відповідно починають і закінчують сесію, а processRaw і getHyp власне розпізнають мова і повертають гіпотези.

process Raw приймає на вході байтові фрейми - дані з мікрофону, а getHyp повертає гіпотезу Hypothesis, що містить припущення про те, що вимовив користувач. Таким чином, організувавши в одному потоці збір даних з мікрофона, і передаючи їх у чергу на обробку декодером, можна отримати результати розпізнавання.

Для отримання даних з мікрофону пристрою використовується стандартний клас Android SDK AudioRecord. У лего конструкторі потрібно вказати тип джерела звуку (стандартний мікрофон, розпізнавання мови, камкодер тощо), частота дискретизації (залежить від моделі, найчастіше це 8 або 16 kHz), формат аудіо-даних і розмірність буфера (також залежить від моделі, чим менше тим краще). Варто відзначити, що тип джерела звуку безпосередньо впливає на якість розпізнавання, тому операційною системою задіюються деякі можливості по оптимізації вихідних даних для кожного конкретного типу (докладніше про це написано в самій документації по класу AudioRecord).

Висновки

Pocketsphinx надає можливість використовувати мовлення у проектах для мобільних платформ, забезпечуючи прийнятну якість розпізнавання і відносну простоту впровадження. Звичайно, багато проблем

залишаються невирішеними. Різноманіття пристроїв на платформі Android породжує найчастіше різну поведінку на різних девайсах - від швидкості розпізнавання до якості звуку з мікрофону і впливу сторонніх шумів. Проте, продемонстрований підхід дозволяє реалізувати реальний продукт, для управління андроїд пристроєм за допогомою голосового інтерфейсу.

Література

1. Жожикашвили В. А. Применение распознавания речи в автоматизированных системах массового обслуживания//Автоматизация и совренеменные технологии, 2003, No 11, с. 23-29 Лобанов Б. М. 2002 В стране и мире.

2. Винцюк Т. К. Анализ, распознавание и интерпретация речевых сигналов. Киев: Наукова думка, 1987.

3. Винцюк Т. К. Распознавание слов устной речи методами динамического програмирования / Кибернетика. 1968. с. 81-88.

4. Baker J. K. Stochastic modeling for automatic speech understanding / Speech Recognition / ed.: D. R. Reddy. New York: Academic Press, 1975. P. 521-542.

5. Дженилек Ф. Распознавание непрерывной речи с помощью статических методом/ ТИИЭР. 1976 с. 131-160.

6. Марков А. А. Пример статистического исследования над текстом «Евгения Онегина», иллюстрирующий связь испытаний в цепь / Известия академии наук. СПб. 4. Т. 7. 1993. С. 153-162.

7. CMU Sphinx (Pocketsphinx on android) [Electronic resource]. - http://cmusphinx.sourceforge.net/wiki/tutorialandroid.

Рецензія/Peer review : 27.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф., Сорокатий Р.В.

УДК 519.21

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, В.А. СОБЧЕНКО
Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ПІДСИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОМПЛЕКСУ

У статті на основі загальної методики використання напівмарківських процесів розроблено узагальнену модель надійності мобільного тепловізійного комплексу. На основі розробленої моделі проаналізовано характер залежності комплексного показника надійності коефіцієнта технічного використання за різних умов.

Ключові слова: надійність, технічна система, мобільний тепловізійний комплекс.

I.I. CHESANOVKYY, V. A. SOBCHENKO
The National Academy of State Border Service of Ukraine named after B. Khmelnytsky

DEVELOPMENT OF THE GENERALIZED MODEL OF RELIABILITY OF SUBSYSTEM MOBILE THERMOVISION COMPLEXIS

Abstract – In the article on the basis of general methodology of the use of markov processes the generalized model of reliability of mobile thermo vision complex is worked out. On the basis of the worked out model character of dependence of complex reliability of coefficient of the technical use index is analysed at different terms.

Keywords: Reliability, technical system, mobile thermo vision complex.

Постановка задачі

З точки зору надійності мобільний тепловізійний комплекс (МТК) може розглядатись як складна технічна система, яка складається з окремих підсистем. Враховуючи велику кількість підсистем з різноманітними показниками і стратегіями експлуатації, поєднання їх в єдину модель з можливістю поточної оцінки надійності є практично недосяжною метою. Проте, для досягнення цієї мети, можна вирішити задачу іншим шляхом – розробивши узагальнену модель підсистеми, що включає всі можливі стани окремих підсистем і трансформується під кожну, в ході експлуатації, за рахунок формування вектору інтенсивностей і ймовірностей переходів. Такий підхід, дасть змогу виробити єдиний підхід в експлуатації окремих підсистем, що поєднані в комплекс, застосовуючи гнучку систему профілактичних та відновлювальних заходів яка забезпечить екстремальні значення основних показників надійності.

Аналіз досліджень та публікацій

В теорії надійності відома велика кількість методів, інженерних методик, які доведені до алгоритмів і програм. Їх авторами є загальновідомі вчені Барзилович Е. Ю. [1], Барлоу Р. Е., Острейковський В. А. [2], Дружинін Г. В., Коваленко І. Н., Ушаков К. З. [3] та ін. Дані роботи є фундаментальними в теорії, проте методи описані в даних роботах часто не вдається застосовувати на практиці.

Виклад основного матеріалу

В основу побудови математичної моделі покладено загальну методику використання напівмарківських процесів.

При розробці узагальненої моделі слід врахувати наступне:

- узагальнена модель має передбачати стратегію експлуатації для відновлювальних об'єктів;
- в узагальненій моделі необхідно передбачити декілька рівнів працездатності, контролю і відновлення;
- в основу моделі має бути покладено дві стратегії – планово-попереджувальну і за станом, що розділені різними рівнями працездатності;
- в початковий стан об'єкт може повернутись тільки після ремонту, або технічного обслуговування в сервісній службі.

Виходячи з цього, з метою математичної формалізації надійності підсистеми МТК припустимо, що в початковий момент часу підсистема знаходиться на початковому рівні працездатності і через деякий час $T_{к1}$, який є невипадковою змінною величиною, планується проведення контролю технічного стану підсистеми. Якщо до призначеного часу $T_{к1}$ підсистема не відмовила, то в цей момент починається проведення заходів по контролю технічного стану, тривалість якого є випадковою величиною $t_{к1}$, розподіленою по довільному закону із функцією розподілу $F_{к1}(t)=P\{t_{к1}<t_{н1}\}$ і кінцевим математичним очікуванням $\bar{t}_{к1}$. Даний вид контролю проводиться з метою перевірки працездатності підсистеми і визначення об'єму проведення ТО, яке проводиться фахівцями підрозділу. Тривалість проведення ТО – випадкова величина $t_{то1}$, розподілена за довільним законом із функцією розподілу $\Phi(t)=P\{t_{то1}<t\}$ і кінцевим математичним очікуванням $\bar{t}_{то1}$. Враховуючи обмежені можливості для проведення діагностування та ТО засобами, що є в підрозділі, після проведення даного виду ТО, підсистема не може повністю відновити свої початкові властивості, тому переходить у стан, який характеризується зниженим запасом працездатності. В цьому стані підсистема перебуває випадковий час $t_{н2}$ до відмови із функцією розподілу $F(t)=1-\exp(-\lambda t)$ чи до початку проведення другого контролю технічного стану. Якщо до призначеного часу $T_{к2}$ підсистема не відмовила, то в цей момент починається проведення заходів по контролю технічного стану, тривалість якого є випадковою величиною $t_{к2}$, розподіленою по довільному закону із функцією розподілу $F_2(t)=P\{t_{к2}<t\}$ і кінцевим математичним очікуванням $\bar{t}_{к2}$. В ході даного виду контролю визначається об'єм та доцільність проведення ТО силами підрозділу. У випадку виявлення потенційних несправностей які неможливо усунути силами підрозділу підсистема переходить у стан очікування ТО, яке проводиться з залученням фахівців сервісної організації. В іншому випадку проводиться ТО силами підрозділу, після чого підсистема переходить у наступний стан зниженої працездатності. Якщо до призначеного часу $T_{то3}$ підсистема не відмовила, то в цей момент починається проведення ТО з залученням фахівців сервісної організації, тривалість якого є випадковою величиною $t_{то3}$, розподіленою по довільному закону із функцією розподілу $\Phi_{то3}(t)=P\{t_{то3}<t_{н3}\}$ і кінцевим математичним очікуванням $\bar{t}_{то3}$. Після проведення даного виду ТО підсистема повертається у початковий стан.

У разі відмови починається виконання заходів щодо відновлення працездатності (ремонт з залучення фахівців сервісної організації) підсистеми, тривалість якого є випадкова величина $t_{відн}$ із довільною функцією розподілу $F_в(t)=P\{t_в<t\}$ і кінцевим математичним очікуванням $\bar{t}_{відн}$. Після проведення даного виду ремонту підсистема повертається у початковий стан.

Для формального представлення коефіцієнта технічного використання та середніх питомих витрат на одиницю часу перебування об'єкта у працездатному стані введемо наступні припущення:

після проведення відновлювальних робіт підсистема повністю відновлює свої початкові властивості, момент проведення чергового контролю технічного стану перепланується і весь процес функціонування підсистеми повторюється;

планові види ремонту на періоді експлуатації, що розглядається, не проводяться.

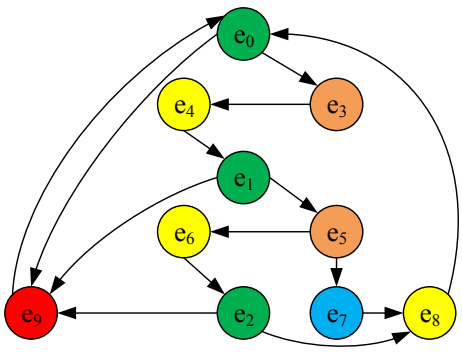


Рис. 1. Граф станів і переходів процесу, що описує функціонування підсистеми

Для формалізації процесу експлуатації, введемо для розгляду напівмарківський випадковий процес $x(t)$, що описує функціонування підсистеми, яка у будь-який момент часу може знаходитись в одному зі станів, представлених на рис. 1:

e_0 – стан, в якому підсистема працездатна і має початкові властивості;

e_1 – стан, в якому підсистема працездатна, але має знижений запас працездатності;

e_2 –передвідмовний стан підсистеми;

e_3 – стан, в якому проводиться контроль технічного стану підсистеми;

e_4 – стан, в якому проводиться ТО силами підрозділу;

e_5 – стан, в якому проводиться контроль технічного стану після переходу у стан зниженого запасу працездатності;

e_6 – стан, в якому проводиться ТО після переходу підсистеми у стан зниженого запасу працездатності;

e_7– стан очікування проведення ТО сервісною організацією;

e_8 –проведення ТО сервісною організацією;

e_9 – відмова.

Стаціонарні ймовірності вкладеного ланцюга Маркова $\pi_i\,(i=\overline{0,9})$, які входять у вираз (1), визначаються із системи рівнянь, що отримують у відповідності із загальною формулою та графом станів і переходів (рис. 1).

Таким чином, задача зводиться до пошуку оптимального або раціонального розподілу періодичності заходів контролю та технічних впливів, а також їх об'ємів, з метою забезпечення екстремальних показників надійності або (і) питомої собівартості експлуатації МТК. Для її вирішення, на основі наявних статистичних даних, щодо експлуатації МТК в підрозділах охорони кордону розробити узагальнену математичну модель надійності окремої підсистеми та математичний апарат аналізу її надійності для подальшого синтезу адаптивної системи експлуатації МТК в межах визначеної стратегії тактичних застосувань.

$$\left.\begin{aligned}
\pi_0 &= \pi_9 p_{90} + \pi_8 p_{80};\\
\pi_1 &= \pi_4 p_{41};\\
\pi_2 &= \pi_6 p_{62};\\
\pi_3 &= \pi_0 p_{03};\\
\pi_4 &= \pi_3 p_{34};\\
\pi_5 &= \pi_1 p_{15};\\
\pi_6 &= \pi_5 p_{56};\\
\pi_7 &= \pi_5 p_{57};\\
\pi_8 &= \pi_2 p_{28} + \pi_7 p_{78};\\
\pi_9 &= \pi_0 p_{09} + \pi_1 p_{19} + \pi_2 p_{29}.
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Рішення системи рівнянь (2) з урахуванням умов нормування $\sum_{i=0}^{9}\pi_i = 1$ дає можливість отримати вирази для стаціонарних ймовірностей π_i :

$$\pi_0 = \frac{1}{K},\ \text{де } K = 2\cdot p_{09} + p_{03}(2p_{19} + 2p_{29} + p_{15}(p_{56}(2p_{28}+2) + p_{57}(2p_{78}+1)+1))$$

$$\pi_1 = \frac{p_{03}}{K};\ \pi_2 = \frac{p_{03}p_{15}p_{56}}{K};\ \pi_3 = \frac{p_{03}}{K};\ \pi_4 = \frac{p_{03}}{K};\ \pi_5 = \frac{p_{03}p_{15}}{K};\ \pi_6 = \frac{p_{03}p_{15}p_{56}}{K};$$

$$\pi_7 = \frac{p_{03}p_{15}p_{57}}{K};\ \pi_8 = \frac{p_{03}p_{15}p_{56}p_{28} + p_{03}p_{15}p_{57}p_{78}}{K};\ \pi_9 = \frac{p_{09} + p_{03}p_{19} + p_{03}p_{29}}{K}.$$

Підставляючи знайдені значення π_i у (1), після нескладних перетворень, отримаємо вираз для визначення коефіцієнта технічного використання у загальному вигляді:

$$K_{\text{тв}} = \frac{a_0 + p_{03}(a_1 + a_2 p_{15}p_{56})}{\begin{aligned}a_0 + p_{03}(a_1 + a_3 + a_4 + a_5 p_{15} + a_9(p_{19}+p_{29}) + p_{15}p_{56}(a_2+a_6) +\\ + p_{15}p_{57}(a_7 + a_8 p_{78}) + a_8 p_{15}p_{28}p_{56}) + a_9 p_{09}\end{aligned}}, \qquad (3)$$

Враховуючи вихідні умови завдання і прийняті припущення та обмеження, з урахуванням графу станів і переходів (рис. 1), стаціонарні перехідні ймовірності p_{ij} та середні часи перебування a_i в станах $i\,(i,j=\overline{0,9}, i\neq j)$, що входять у (3) будуть мати вигляд:

$$p_{03} = F_1(T_{\text{к}1}) = P\{t_{в1} > T_{\text{к}1}\};\ p_{09} = 1 - F_1(T_{\text{к}1});\ p_{15} = F_2(T_{\text{к}2}) = P\{t_{в2} > T_{\text{к}2}\};$$

$$p_{19} = 1 - F_2(T_{\text{к}2});\ p_{28} = F_3(T_{\text{ТО}3}) = P\{t_{в3} > T_{\text{ТО}3}\};\ p_{29} = 1 - F_3(T_{\text{ТО}3});\ p_{56} = \beta\ ;$$

$$p_{57} = 1 - p_{56};\ p_{34} = p_{41} = p_{78} = p_{80} = p_{90} = p_{62} = 1;$$

де β – невипадкова величина, що визначає доцільність проведення ТО3 (приймає нульове значення, якщо відновлення своїми силами не можливе; 0,5 – якщо підсистема може обслуговуватись в підрозділі; 1 – якщо ТО в сервісній службі не передбачено);

$$a_0 = \int_0^{T_{к1}} \overline{F_1}(t)dt;\ a_1 = \int_0^{T_{к2}} \overline{F_2}(t)dt;\ a_2 = \int_0^{T_{TO3}} \overline{F_3}(t)dt;\ a_3 = M\{\tau_{K1}\};\ a_4 = M\{F_{TO1}(t)\};$$

$$a_5 = M\{\tau_{K2}\};\ a_6 = M\{F_{TO2}(t_{TO2})\};\ a_7 = \tau_{очік};\ a_8 = \tau_{TO3} + \tau_{TP};\ a_9 = \tau_P + \tau_{TP}.$$

Після підстановки формул для a_i і p_{ij} в (3) отримаємо кінцеве розрахункове співвідношення для коефіцієнта технічного використання підсистеми:

$$K_{тв}(T_{k1},T_{к2}) = \frac{M_{н1} + F_1(T_{k1})\cdot(M_{н1} + M_{н3} + F_2(T_{к2})\cdot\beta)}{M_{н1} + F_1(T_{k1})\Big[M_{н2} + M_{к1} + \overline{t_{mo}} + \overline{t_{к2}}\cdot F_2(T_{k2}) + \overline{t_{відн}}\cdot \atop \cdot(2 - F_2(T_{k2}) - F_3(T_{mo3})) + F_2(T_{k2})\cdot\beta\cdot(\overline{t_{пр}} + \overline{t_{mo3}}) + \atop + \overline{t_{mo3}}\cdot F_2(T_{k2})\cdot F_3(T_{mo3})\cdot\beta\Big] + \overline{t_{відн}}\cdot(1 - F_1(T_{k1}))}, \quad (4)$$

де

$$M_0 = \min(\bar{t}_{н1}, T_{K1}) = \int_0^{T_{K1}} (1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \delta_{н1}^2}\int_0^t \exp\left(-\frac{x - \overline{t_{н1}}}{2\delta_{н1}^2}\right)dx)dt;$$

$$M_1 = \min(\bar{t}_{н2}, T_{K2}) = \int_0^{T_{K2}} (1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \delta_{н2}^2}\int_0^t \exp\left(-\frac{x - \overline{t_{н2}}}{2\delta_{н2}^2}\right)dx)dt;$$

$$M_2 = \min(\bar{t}_{н3}, T_{TO3}) = \int_0^{T_{TO3}} (1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \delta_{н3}^2}\int_0^t \exp\left(-\frac{x - \overline{t_{н3}}}{2\delta_{н3}^2}\right)dx)dt.$$

Для визначення оптимальних значень періодичності контролю технічного стану необхідно взяти похідну від (4) по $T_{k1}, T_{к2}$ і прирівняти її до нуля.

На рис. 2 та рис. 3 показано залежність коефіцієнта технічного використання $K_{тв}(T_{к1})$ та $K_{тв}(T_{к2})$ при різних значеннях $T_{к2}$ та $T_{к1}$ відповідно.

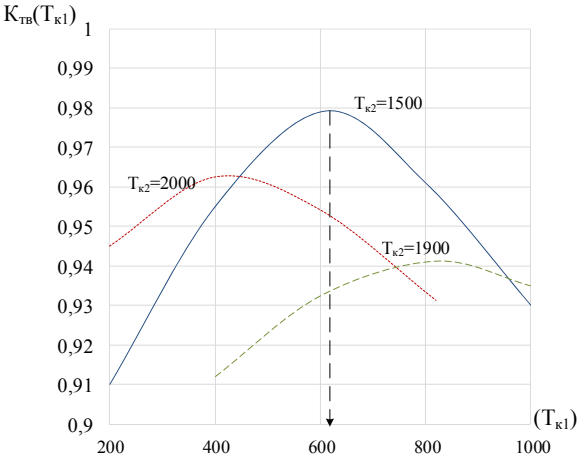


Рис.2. Характер залежності $K_{тв}(T_{к1})$ від періодичності $T_{к1}$ контролю при різних значеннях $T_{к2}$

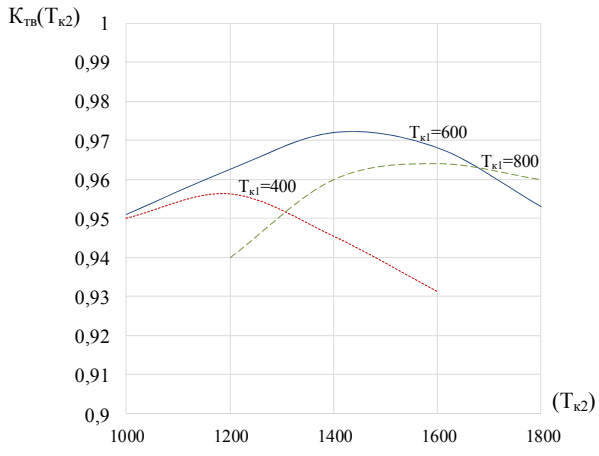


Рис. 3. Характер залежності $K_{тв}(T_{к2})$ від періодичності $T_{к2}$ контролю при різних значеннях $T_{к1}$

З отриманих графіків видно, що екстремальне значення $K_{тв}$ отримується при $T_{к1} = 610\ год.$, $T_{к2} = 1500\ год.$

Висновки

Результати дослідження отриманої узагальненої моделі надійності підсистеми МТК як окремого об'єкта показують, що застосування дворівневого підходу організації попереджувальних профілактичних заходів дає змогу значно оптимізувати ефективність системи експлуатації. Як видно з отриманих графіків, оптимальні значення параметрів ТО для одного рівня можуть бути досягнуті для будь-якого фіксованого значення періодичності іншого рівня, що актуально умовам комплексного застосування різних об'єктів, коли суміщення профілактичних заходів різних елементів у достатній мірі неможливе. Дослідження також показало, що оптимальне значення параметрів системи профілактичних заходів в глобальному розумінні також існує, воно є єдиним і складає потенційну оцінку ефективності багаторівневих систем організації профілактичних заходів в системі експлуатації складних систем.

Література

1. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович. – М., 1982. – 231 с.
2. Острейковский В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – М., 2003. – 463 с.
3. Надёжность технических систем : справочник / Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.П. и др. / под ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

Рецензія/Peer review : 18.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Лисий М.І.

УДК 681.325.3

І.М. ЛАЗАРОВИЧ
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ
С.І. МЕЛЬНИЧУК
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАВАДОСТІЙКОГО ПЕРЕДАВАННЯ ФАЗОМАНІПУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПРОЦЕДУРИ РАНДОМІЗАЦІЇ

В роботі наведено вдосконалення методу завадостійкого передавання даних з використанням процедури рандомізації фазоманіпульованих сигналів (BPSK) із адаптивною апертурою для детектування прийнятої інформації у вузькосмугових каналах зв'язку. Наведено алгоритм та на основі розробленої програмної моделі наведено дослідження характеристик завадостійкості, проаналізовано переваги і недоліки запропонованого методу і розглянуто перспективи для подальших досліджень.

Ключові слова: дисперсія, кореляційна функція, математичне сподівання, оптимальне приймання, спектр, програмна модель, рандомізація, фазова маніпуляція, сигнал, цифрова обробка сигналів, шифрування, шумоподібний сигнал, хешування.

IGOR MIKOLAYEVICH LAZAROWYCH
Vasyl Stefanyk Precapathian National Univercity, Ivano-Frankivsk, Ukraine
STEPAN IVANOVYCH MELNYCHUK
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine

PERFECTION OF NOISE IMMUNITY METHOD OF BINARY PHASE-SHIFT KEYING SIGNALS TRANSMISSION BASIS ON RANDOMIZATION PROCEDURE

The aim of work is noise immunity method of binary phase-shift keying signals transmission basis on randomization procedure . The offered algorithm of phase-shift keying signals detection with the use of randomization and adaptive estimation of cross-correlation function allows to accept signals at intensity of noises, that in 4 times exceeds the level of useful signal. Thus a binary phase-shift keying signals that does not require wide bandwidth, as in the case of noise signals. In comparison with earlier figures obtained from randomization methods with constant aperture, this method has 20-25% higher noise immunity. In general, the method allows to accurately receive signals in the signal to noise ratio up to 0.22-0.25. The effectiveness of the method tested on basis of the programming model.

Keywords: dispersion, correlation function, expectation, optimal receiving, spectrum, software model, randomization, phase shift keying of signals, digital signal processing, encryption, noise-signal, hashing.

Вступ

Забезпечення безпомилкового передавання даних – це на сьогоднішній день одна із найважливіших задач в галузі телекомунікацій. Безперервне зростання кількості продукованої людством інформації складає не менше 50-70% щороку. Як правило, інформація передається через різнотипні канали зв'язку, тому дедалі більш гостро стає проблема якісного і надійного приймання даних.

На сьогоднішній день одними із найбільш ефективних в сенсі максимальної завадозахищеності є методи передавання даних з використанням шумоподібних сигналів, зокрема М-послідовностей, кодів Баркера, Гоулда, Касамі [1,2]. Водночас, їх застосування має ряд обмежень, одним із яких є необхідність широкосмугових каналів зв'язку, що в цілому приводить до збільшення складності і вартості системи передавання. Методи передавання даних на основі гармонічних вузькосмугових сигналів [2,3], можуть бути ефективними для сучасних застосувань, проте не здатні забезпечити належний рівень стійкості до завад.

Отже, розробка, дослідження та застосування нових ефективних методів передавання даних, які відповідають сучасним потребам і вимогам, є актуальною задачею.

Постановка завдання

В роботах [4] та [5] запропоновано використати рандомізацію для завадостійкого передавання сигналів. Розглянутий метод використовує двійкову фазову маніпуляцію сигналів BPSK, отже не вимагає широкосмугового каналу передавання і здатен працювати при максимальному відношенні сигнал/завада 0,3 – 0,33. Аналіз роботи методу, зокрема оцінок кореляції для прийнятого рандомізованого BPSK сигналу

показав, що завадостійкість в цілому може бути підвищено за рахунок зміни адаптивної апертури при детектуванні сигналів. Отже, метою роботи є дослідження методу рандомізації прийнятого сигналу, визначення способів формування «плаваючої» апертури та перевірка ефективності запропонованих рішень.

Результати дослідження

Основна ідея методу підвищення завадостійкості при використанні фазової маніпуляції поляє в рандомізації отриманого в приймачі сигналу. Рандомізація (англ. *random* – випадковий, нерегулярний, безпорядковий) – це нелінійна процедура навмисного внесення "випадковості" або шумоподібності в обробку вибіркових даних для перетворення деяких систематичних помилок у випадкові. Рандомізація полягає в перемішуванні інформаційної вибірки відповідно до певного закону[4].

Оператор рандомізації $\Re an$ послідовності $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots x_n\}$ позначає дію, яка полягає в переміщенні i-го елемента на місце j-го елемента послідовності X, а відповідність між i та j називають законом рандомізації [4]:

$$X = \{x_i\}, \qquad \Re an(X) = \Re an(\{x_i\}) = X^{\Re an}, \tag{1}$$

$$X^{\Re an} = \{x_j\}, \quad i = \overline{1,n}, \quad j = k_i. \tag{2}$$

де $K = \{k_i\}$ – масив-ключ рандомізації $\Re an$.

При рандомізації послідовності X утворюється послідовність $Y = \{y_1, y_2, \ldots, y_j, \ldots y_n\}$, причому $x_i = y_j$, $i = \overline{1,n}$,

Рандомізація дозволяє виконати перетворення форми сигналу, зокрема за її допомогою можна сформувати сигнал, який по своїй формі і властивостях кореляційної функції наближений до псевдовипадкового.

Згідно з попередніми дослідженнями рандомізації для перетворення форми сигналу, найкращих показників завадостійкості можна досягнути при застосуванні М-послідовностей та гаусівського розподілу [4].

Узагальнена структурна схема, яка відображає функціонування методу наведена на рис. 1.

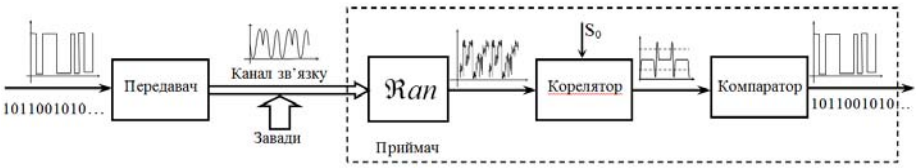


Рис.1 Структура системи передавання з рандомізацією

Нехай від джерела інформації надходить бітова послідовність. Передавач формує фазоманіпульований вихідний сигнал, який в загальному описується виразом [1]:

$$S_m(t) = g(t)\sin[2\pi f_c t + \varphi_m(t)] \tag{6}$$

де $g(t)$ – визначає форму сигналу, $\varphi_m(t)$ – модулюючий сигнал, який у випадку BPSK може приймати 2 значення, f_c – частота несучої, t – час.

Двійкові дані логічного «нуля» та «одиниці» передаються наступними сигналами відповідно:

$$S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}}\cos(2\pi f_c t), \qquad S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}}\cos(2\pi f_c t + \pi) \tag{7}$$

де E_b – енергія інформаційної одиниці, T_b – тривалість передавання символу.

Канал зв'язку піддається впливу адитивної завади. Імовірність помилкового приймання біту інформації при впливі гаусового білого шуму AWGN визначається виразом:

$$P_1 = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \qquad \text{де} \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}}dt \tag{8}$$

Після оцифрування прийнятого зашумленого сигналу в приймачі виконується перший етап обробки –рандомізація відповідно до заданого ключа K_i. Ключ рандомізації формується таким чином, щоб результуючий сигнал по формі був наближений до псевдовипадкового або шумоподібного. Методика формування ключів наведена в роботі [5].

Далі для вибірки рандомізованого сигналу X_k^R визначається кореляція із взірцевим сигналом нуля чи одиниці шляхом обчислення одного із видів функцій взаємокореляції [6]:

взаємоструктурної функції:

$$C_{xy}(j) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_{i+j})^2 \quad (9)$$

взаємоструктурної функції:

$$R_{xy}(j) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \overset{o}{x}_i \cdot \overset{o}{y}_{i+j} \quad (10)$$

взаємомодульної функції:

$$R_{xy}(j) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \overset{o}{x}_i \cdot \overset{o}{y}_{i+j} \quad (11)$$

функції взаємоеквівалентності:

$$F_{xy}(j) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \overset{\vee}{Z}_{xy} \quad (12)$$

де $\overset{o}{x}_i, \overset{o}{y}_i$ - центровані значення відліків сигналу, $\overset{\vee}{Z}_{xy}$ - це функція менше з двох, що визначається як:

$$\overset{\vee}{Z}_{ij} = \begin{cases} S_i, & S_i < S_j \\ S_j, & S_i \geq S_j \end{cases} \quad (13)$$

Вихідний сигнал корелятора, на вхід якого подано фазоманіпульований спотворений AWGN-шумом сигнал, який представляє бітову послідовність 01010 з відношенням сигнал/шум що складає 0,25, при використанні взаємоструктурної функції, наведено на рисунку 2, а. Як видно з рисунка, функція кореляції має чіткі пікові значення, проте детектування сигналу при встановленні фіксованої апертури та вказаному відношенні сигнал/шум є неможливим внаслідок сильного спотворення кореляції.

Автором пропонується застосувати адаптивну апертуру, яка враховує зміну середнього значення функції кореляції на заданому проміжку. Для реалізації даного методу пропонується наступний алгоритм:

1. Визначити ковзне математичне сподівання [6] кореляційної функції згідно виразу:

$$M_{Rxx(j)} = \frac{1}{n}\sum_{i=1+j}^{n+j} R_{xy}(i+j) \quad (14)$$

де $R_{xy}(i+j)$ - значення взаємокореляційної функції, n – розмір вибірки для обчислення ковзного математичного сподівання.

2. Визначити середньо-квадратичне відхилення кореляційної функції:

$$\sigma_{Rxy} = \sqrt{D_{Rxy}} \quad (15)$$

де D_{Rxy} - дисперсія функції кореляції на вибраному проміжку n, що обчислюється згідно виразу:

$$D_{Rxy} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(R_{xy}(i) - M_{Rxy})^2 \quad (16)$$

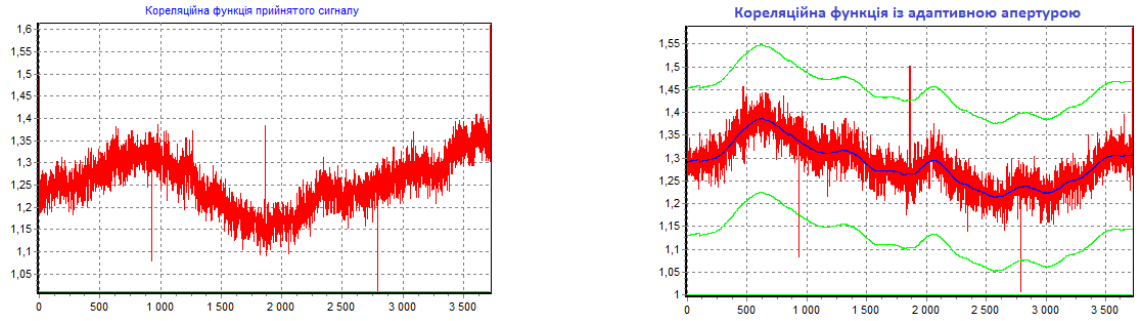
де M_{Rxy} - математичне сподівання кореляційної функції на вибраному проміжку n.

3. Встановити значення адаптивної апертури кореляційної функції згідно виразу:

$$a_i = M_{Rxx(j)} \pm \Delta\sigma_{Rxy} \quad (17)$$

де k – коефіцієнт, який враховує тип функції кореляції

4. Перевірити вихід значення кореляційної функції за межі апертури, що відповідатиме детектування інформаційного біту. На рисунку 2,б наведено приклад кореляційної функції спотвореного AWGN-шумом сигналу, для якої встановлена адаптивна апертура.

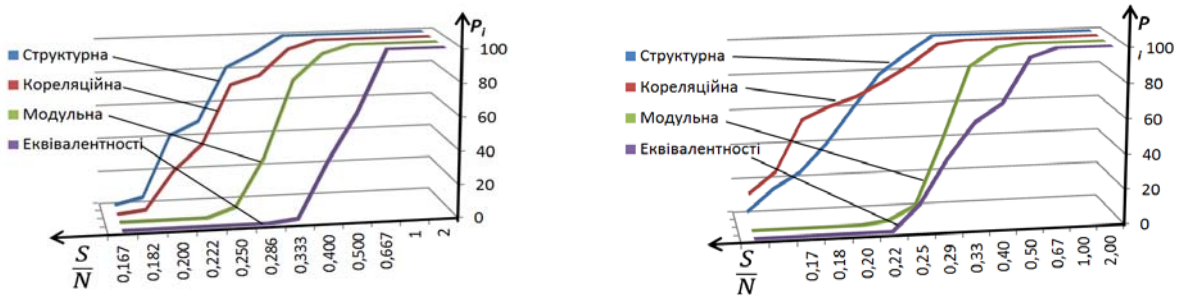


а) **б)**

Рис.2 Кореляційні функції рандомізованого BPSK-сигналу

Для перевірки ефективності запропонованого алгоритму було розроблено програмну модель, яка реалізує приймання BPSK-сигналів і реалізує вищенаведений алгоритм. За її допомогою проведено ряд експериментів, які підтвердили ефективність методу. На рисунку 3 наведено функції імовірності

правильного приймання сигналів P_i, спотворених адитивним AWGN-шумом із змінним відношенням сигнал/шум *S/N*. Рисунок 3,*а* відображає ймовірність для рандомізації з використанням М-послідовностей, а рисунок 3,*б* – рандомізації з рівномірним розподілом. Проведені експерименти дозволили встановити оптимальне значення коефіцієнта *k* із виразу 17.



а) *б)*

Рис.3 Функції імовірності правильного приймання

На основі отриманих табличних значень залежності Рі від інтенсивності шуму та коефіцієнта Δ було побудовано поверхню (рисунок 4), що дозволило обрати його оптимальне значення, що визначає адаптивну апертуру, яке знаходиться в межах 3...3,5, що відповідає відомому [7-8] правилу $3\sigma_x$.

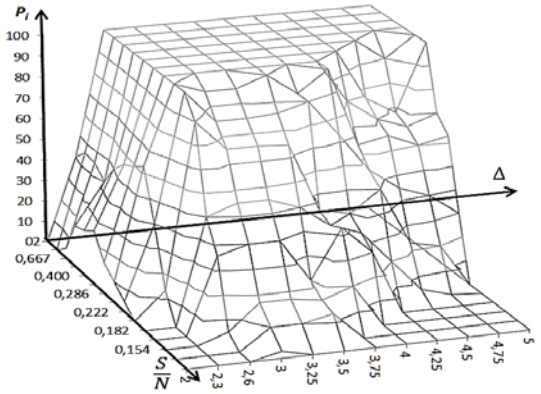


Рис.4 Функція залежності P_i від інтенсивності шуму та коефіцієнта апертури k

Наведені рішення дозволили досягнути ймовірності правильного приймання сигналів P_i, що прямує до 100% при відношенні сигнал/шум до 0,22-0.25, що складає 7-8дБ.

Висновки

Таким чином, запропонований алгоритм детектування фазоманіпульованих сигналів з використанням рандомізації та адаптивної оцінки кореляційної функції дозволяє приймати сигнали при інтенсивності шумів, що до 4-х разів перевищує рівень корисного сигналу. При цьому в канал зв'язку подається фазоманіпульований сигнал, який не вимагає широкої смуги пропускання, як у випадку застосування шумоподібних сигналів. В порівнянні із отриманими раніше показниками методів на основі рандомізації із постійною апертурою, даний метод має на 20-25% вищу завадозахищеність. Недоліком методу є необхідність додаткових обчислень для визначення адаптивної апертури, що в цілому приводить до ускладнення технічної реалізації.

Література

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

2. Прокис Джон. Цыфровая связь. Пер. с англ./Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800с.: ил.

3. Варакин Л.Е. Системы святи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

4. Лазарович І.М. Перспективи застосування методів рандомізації для формування сигналів в оптимальному приймачі / І.М. Лазарович // Наукові вісті Інституту менеджменту та економіки "Галицька академія" (технічні науки). – 2011. – № 2(19).– С. 44 – 47.

5. Лазарович І. М. Реалізація методів сигнальної рандомізації для завадостійкого передавання даних / І.М. Лазарович // Вісник Хмельницького національного університету (технічні науки). – 2014. – № 6. – Хмельницький: ХНУ, 2014. с.165-168.

6. Николайчук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем. Навчальний посібник /

Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух. – Тернопіль: ТзОВ «Техно-граф», 2010.-392с., іл.

7. Феер К. Беспроводная цифровая связь: методы модуляции. — Пер. с англ. // Под. ред. В. И. Журавлёва. — М.: Радио и связь, 2000. — 520 с.

8. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. - М.: Техносфера, 2011. - 904 с.

Рецензія/Peer review : 25.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.ф-м.н. проф. Філевич П.В.

УДК 621.396.12

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ
Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького
Л.В. КАРПОВА, Д.О. ЛЕВЧУНЕЦЬ
Хмельницький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ УЗГОДЖЕНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ВУЗЬКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПІДХОДІВ ЛОКАЛЬНО-БАЗИСНОГО АНАЛІЗУ

В даній статті висвітлено питання вагової обробки вузькосмугових частотно-модульованих сигналів під час розв'язання задач синтезу алгоритмів їх узгодженої фільтрації. Наведено результати оцінки потенційної ефективності застосування вагової обробки спектру вузькосмугового сигналу, який містить декілька часових інтервалів локалізації спектральної щільності. Для визначення центрів інтервалів локалізації та їх тривалості застосовано метод стаціонарної фази, який, як показано в результатах, за сучасних можливостей елементної бази набуває іншого значення в задачах обробки сигналів.

Ключові слова: стаціонарна фаза, сигнал, частотна модуляція, виявлення, узгоджений фільтр.

I.I. CHESANOVSKYY
National Academy of State Border guard service of Ukraine named after B. Khmelnytskyi
L.V. KARPOVA, D.O. LEVCHUNETS
Khmelnytsky National University

IMPROVEMENT OF METHODS OF MATCHED FILTERING NARROWBAND SIGNALS BASED ON APPROACHES LOCALLY-A BASIC ANALYSIS

This article is devoted to the question of weight treatment narrow band frequency-modulated signals when solving problems of synthesis algorithms matched filtering. The results of the evaluation of the potential effectiveness of using a weighting spectrum processing a narrowband signal that contains several time intervals of localization of the spectral density. To determine the centers of the intervals of localization and their duration was applied the method of stationary phase, as shown in the results, with today's facilities, element base, acquires a different value in the tasks of signal processing.

Keywords: stationary phase, signal, frequency modulation, detection, matched filter.

Перехід радіосистем на широкосмугові технології передачі дискретних повідомлень обумовили значний прогрес в питаннях підвищення енергетичної і частотної ефективності використання радіо ресурсу [1]. Проте, високі показники ефективності таких систем досягаються лише в умовах високої «завантаженості» радіоканалу, що притаманно тільки окремому класу телекомунікаційних і радіолокаційних систем, в інших випадках доцільність розширення смуги частот радіоканалу, є як правило, невиправданою і більш оптимальним варіантом є «вузькосмугові» варіанти побудови радіоканалу [1, 2]. Іншим випадком, при якому канал не може бути реалізований із застосуванням широкосмугових сигналів, є системи добування інформації, в яких корисна інформація представляє собою вузько смуговий модулюючий процес зондуючого сигналу. В багатьох випадках, цей процес є детермінованим в обмеженій множині реалізацій і задача зводиться лише до правильного розрізнення наявної реалізації. Це типовий випадок локації (радіо, акусто, сейсмо), коли основна проблема на етапі обробки сигналів полягає в необхідності розрізнення сигналів, що слабо рознесені як в часі так і по частоті. Особливість цього випадку полягає в тому, що достеменно відомо про різну частотно-часову динаміку сигналів, яка обумовлена різними просторовими формами об’єктів зондування. Проте, в наслідок вузькосмуговості зондуючих сигналів і самих модулюючих фізичних ефектів, реалізувати цю особливість у вигляді узгодженого алгоритму практично неможливо. Розглянемо задачу виявлення фінітного сигналу, що модульований по частоті вузько смуговим полігармонійним процесом. Модель такого сигналу може бути представлена у вигляді

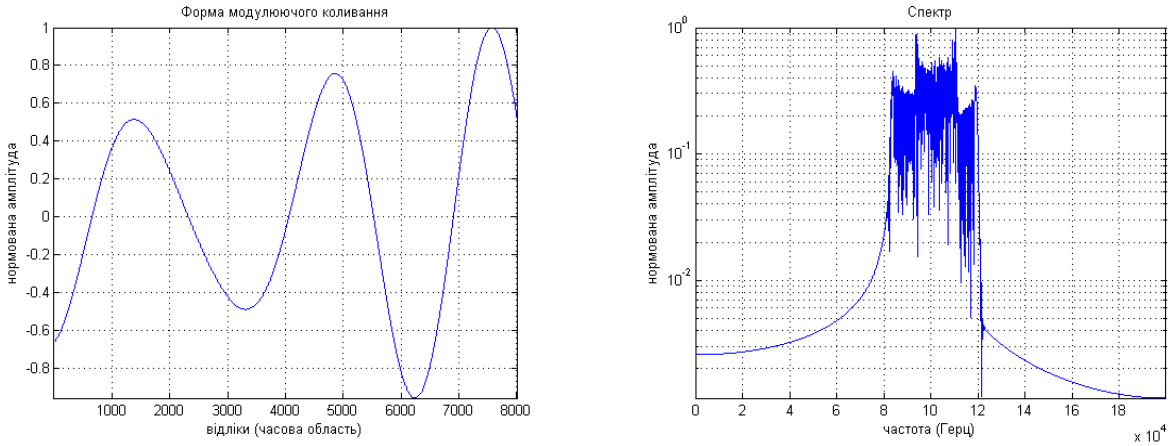
$$u(t) = U(t)\cos(\omega_0 t + \psi(t)), \tag{1}$$

$$U(t) = \begin{cases} const, & 0 \le t \le \tau_i \\ 0, & t < 0, t > \tau_i \end{cases}, \qquad \psi(t) = \Delta\omega \int_0^t \sum_i \sin(\Omega_i x + \varphi_i) dx,$$

де τ_i – тривалість сигналу (імпульсу); $\Delta\omega$ – девіація частоти.

Одна із можливих форм (випадкова комбінація близьких частот і початкових фаз) модулюючого сигналу (1), що містить чотири складовіта амплітудний спектр модульованого сигналу приведено на рис. 1. Враховуючи відносно коротку тривалість сигналу, отриманий спектр містить достатньо велику кількість

складових, при цьому, так як модуляція здійснюється з невеликим коефіцієнтом глибини модуляції, вузькосмуговість сигналу зберігається.



а) **б)**

Рис. 1. Форма модулюючого полі гармонійного коливання (а) і спектр частотно модульованого сигналу (б)

Таким чином, оскільки сигнал вузькосмуговий, застосування узгодженого алгоритму його обробки значного ефекту не дає. Через обмежену смугу частот і коротку тривалість відліки шуму володіють високим рівнем кореляції, а отже потрібно шукати інші підходи побудови узгоджених алгоритмів.

Якщо виходити з інтуїтивних уявлень про частотну модуляцію і розглянути частотно-часову структуру спектру сигналу (спектрограму), що показана на рис. 2, можна побачити, що навіть при грубій оцінці частотної динаміки вона достатньо чітко проглядається.

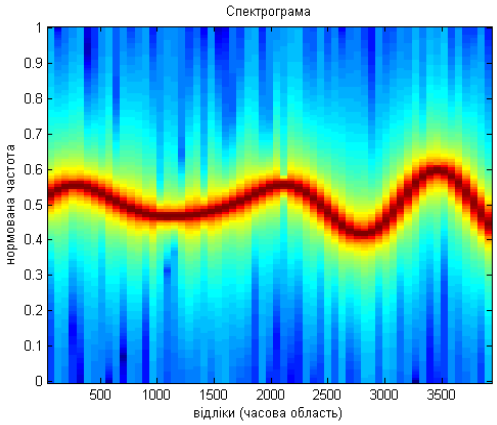


Рис. 2. Спектрограма реалізації сигналу з полігармонійною частотною модуляцією

Отримана спектрограма збігається з очікуваним уявленням про частотну модуляцію, як про полігармонійний процес, проте вона демонструє і додаткову особливість таких сигналів, яка полягає в тому, що в миттєвому (в сенсі вузького проміжку часу аналізу) спектрі присутня значна динаміка його локалізації, в залежності від миттєвої динаміки форми модулюючого сигналу. Саме ця особливість створює передумови до застосування віконного або локально-базисного підходів для більш ефективної обробки таких сигналів за умови, що вікно в двовимірному просторі забезпечить необхідну локалізацію і буде володіти динамічним «центром ваги».

Те ж саме можна підтвердити з точки зору локально-базисних перетворень. На рис. 3 приведено результат вейвлет перетворення сигналу, з якого також видно достатньо чітку локалізацію енергії в певних зонах спектру, а отже, задача узгодженої фільтрації може бути виконана значно ефективніше, за рахунок подавлення частотних складових, в смузі частот сигналу, в певні інтервали часу.

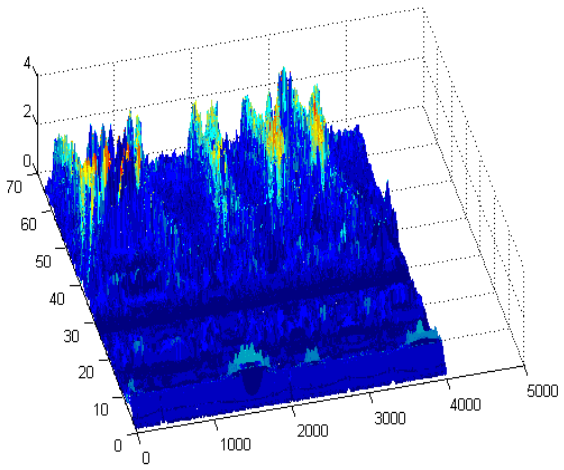


Рис. 3. Вейвлет перетворення сигналу з використанням вейвлету Шеннона (Shan)

Таким чином, основна ідея підходу узгодженої фільтрації вузькосмугового сигналу базується на припущені, що спектральна локалізація сигналу в різних часових інтервалах неоднакова, а отже, застосувавши вагову обробку спектру сигналу в часових інтервалах де локалізація максимальна (або вища певної межі) можна отримати додатковий виграш у відношенні сигнал/шум на виході фільтру. Для реалізації нестаціонарної (з динамічним ваговим вікном) вагової обробки спектру сигналу можливі два підходи – віконне перетворення Фур'є і вейвлет перетворення. Проте, з енергетичної точки зору, для випадку вузькосмугових сигналів, другий варіант є програшним, оскільки в місцях локалізації спектру ширина смуги частот (масштабний діапазон) значно розширяється, що чітко видно на рис. 3.

В загальному випадку, частотно-часове представлення сигналу може бути виражене у вигляді

перетворення

$$S(t,\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}W(t-\tau)u(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau\,, \tag{2}$$

де $W(x)$ – віконна функція, що забезпечує локалізацію сигналу (або базису) в часовому вимірі.

Проблема вибору ядра інтегрування $W(t-\tau)e^{-j\omega\tau}$, є ключовою в задачах локально-базисного перетворення, оскільки саме в ній закладено потенційну невизначеність, що балансує між частотною і часовою локалізацією. Із спектрограми, що показана на рис. 2 видно, що для ефективного застосування віконного перетворення, сама віконна функція має бути динамічною як у відношенні часової, так і у відношенні частотної локалізації. І це основна проблема застосування віконного перетворення у випадку вузькосмугових процесів, оскільки наявність динамічної складової у віконній функції $W(x)$ призводить до значного розширення її спектру, як правило, значно більшого ніж ширина спектру самого вузькосмугового сигналу, що повністю нівелює доцільність такої обробки.

Проте, аналізуючи різні представлення цих двох сигналів, стає очевидною одна особливість, а саме, наявність зон, де енергія сигналу концентрується значно вище ніж в інших місцях. Використовуючи цю особливість можна досягти значного виграшу від використання віконного (локально-базисного) перетворення застосовуючи стаціонарні віконні функції в часові інтервали, де спектр сигналу максимально концентрується.

Структура пристрою, що реалізує даний підхід приведена на рис. 4.

Ключовим моментом застосування даного підходу, є визначення необхідних часових затримок при позиціонуванні вагових вікон та визначення їх порядку. Для вирішення цієї задачі можна скористатись відомим підходом, що базується на асимптотичних методах наближеної спектральної оцінки сигналів – методом стаціонарної фази [3]. Даний метод базується на застосуванні наближеної формули

$$G=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x)e^{-p\varphi(x)}dx\approx\sqrt{\frac{2\pi}{p\varphi''(x_0)}}f(x_0)e^{-p\varphi(x_0)}\,, \tag{3}$$

яка дає змогу визначати спектральну щільність сигналу в «особливих» точках – так званих точках стаціонарної фази, в яких концентрація спектральної щільності найвища. Особливість даних точок полягає в тому, що в них відсутня динаміка повної фази сигналу, тобто

$$\frac{d\psi(t)}{dt}=-\omega_0\,. \tag{4}$$

А це означає, що саме в цих точках є сенс проводити вагову обробку спектру сигналу для потенційного підвищення ефективності алгоритму виявлення та розрізнення. При цьому, важливим питанням залишається задача вибору типу вагового вікна та його локалізації в кожній окремій точці стаціонарної фази.

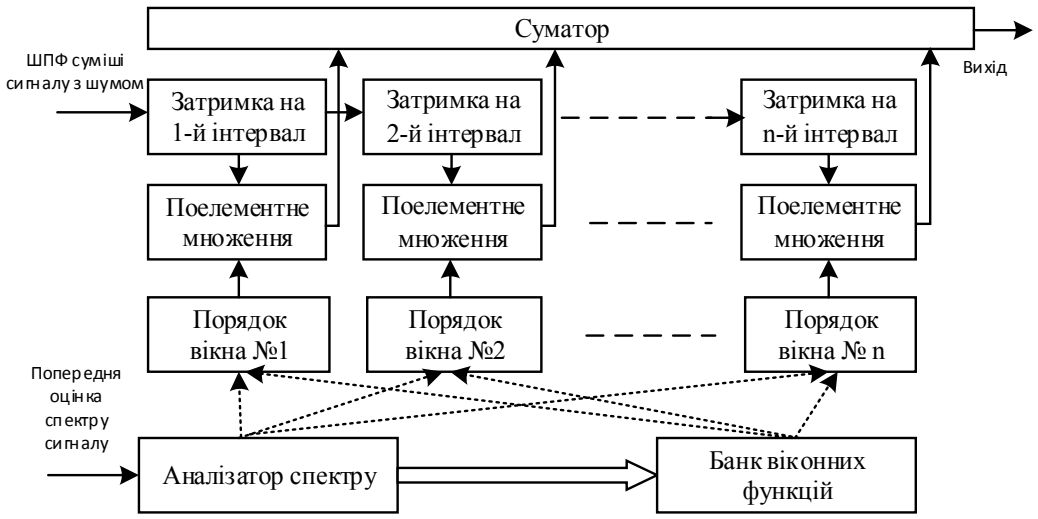


Рис. 4. Структурна схема пристрою частотно-часової обробки нестаціонарних сигналів

Часову локалізацію вагових вікон (порядок вікна) доцільно визначати з оцінки радіусу впливу [1, 2] стаціонарної точки, що в фізичному розумінні є другою похідною від фазової функції. На рис. 5 наведено результати оцінки точок стаціонарної фази та їх радіусів впливу. Як видно з рисунків, частотно-часова структура сигналу визначається лише невеликими інтервалами в околицях точок стаціонарної фази, оскільки в інших інтервалах сигнал характеризуються майже рівномірним спектром. Таким чином, вагову обробку сигналу доцільно проводити лише в інтервалах, де розміщуються точки стаціонарної фази і з

локалізацією, що відповідає їх радіусу впливу.

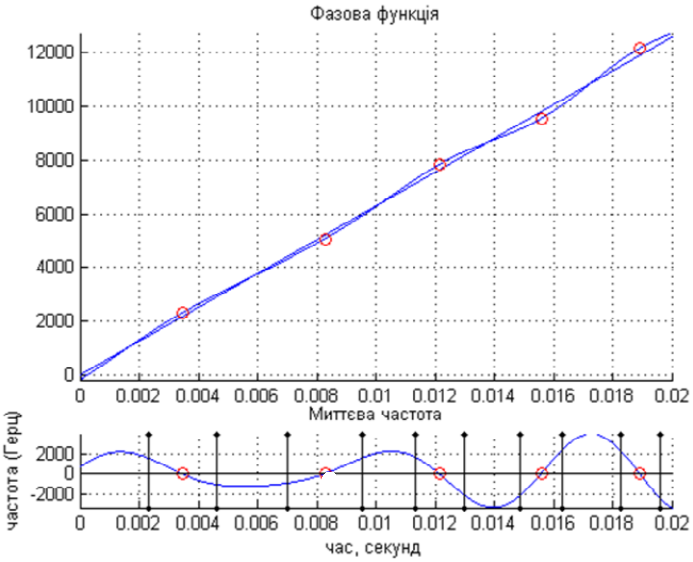


Рис. 5. Оцінка точок стаціонарної фази

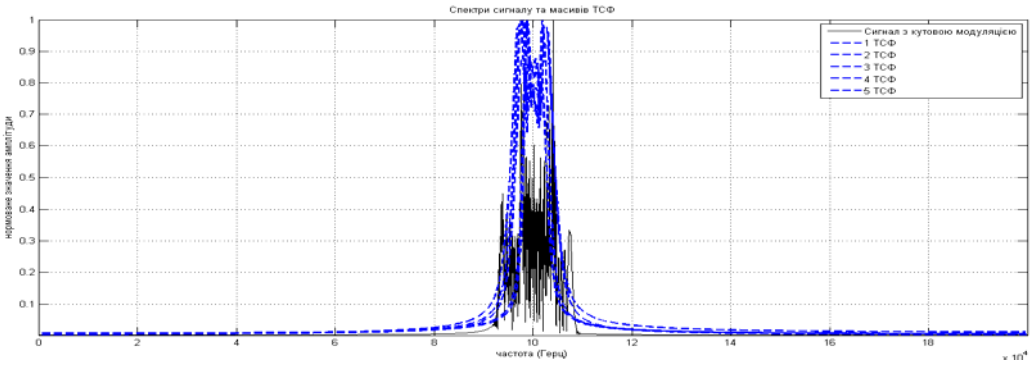


Рис. 6. Спектральні щільності сигналу в цілому і околиць точок стаціонарної фази

На рис. 6 приведено результати розрахунку спектральної щільності вузькосмугового радіосигналу отриманого шляхом ШПФ і взаємно нормовані спектри цього ж сигналу в окремих точках стаціонарної фази. Як видно з рисунку, спектри знаходяться в одній смузі, що підтверджує адекватність зроблених припущень.

На рис. 7 приведено результати розрахунку кореляційних функцій зважених інтервалів сигналу в точках стаціонарної фази, та оцінки енергії сигналу, що припадає на окремі точки стаціонарної фази в інтервалах радіусів впливу. Як видно з результатів, частка енергії сигналу, що припадає на дані інтервали складає близько 50 відсотків (46,1%), а це підтверджує доцільність застосування додаткової обробки в даних інтервалах. При цьому, встановлена особливість вузько смугових частотно модульованих сигналів, яка відкриває можливість застосування стаціонарних вагових вікон різного типу та порядку з рознесенням їх «центрів» в місця найбільшої локалізації спектру сигналу.

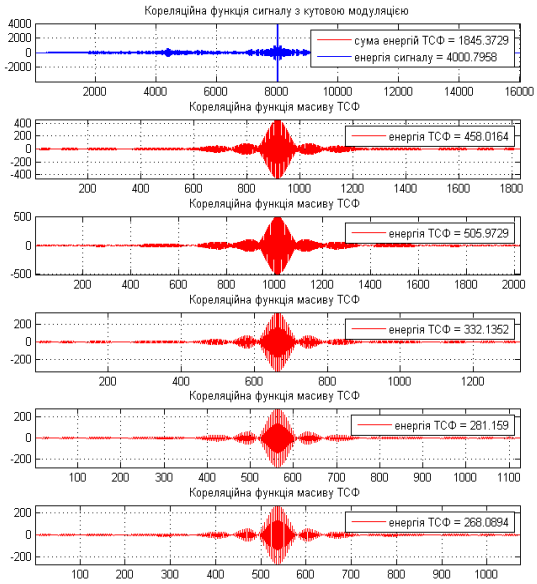


Рис. 7. Кореляційні функції сигналу в інтервалах радіусу впливу різних точок стаціонарної фази

Висновки

Таким чином, отримані результати дослідження показують ефективність застосування віконного перетворення при побудові оптимальних алгоритмів обробки вузькосмугових сигналів. Як видно із результатів моделювання, застосування вагової обробки спектру сигналу лише в околицях стаціонарних точок дає змогу підвищити ефективність алгоритмів виявлення та розрізнення сигналів за рахунок їх обробки лише в інтервалах найбільшої частотної концентрації.

Література

1. Вопросы перспективной радиолокации : коллективная монография / под ред. А.В.Соколова. – М. : Радиотехника, 2003. – 512 с.
2. Селекция и распознавание на основе локационной информации / А.Л. Горелик, Ю.Л. Барабаш, О.В. Кривошеев, С.С. Эпштейн ; под ред. А.Л. Горелика. – М. : Радио и связь, 1990. – 240 с.
3. Вакман Д.Е. Асимптотические методы в линейной радиотехнике / Вакман Д.Е. – М. : Сов. радио, 1962. – 247 с.

Рецензія/Peer review : 19.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., професор Мартинюк В.В.

УДК 681.32

В.П. СЕМЕРЕНКО
Вінницький національний технічний університет, Україна

КОДУВАННЯ КОДІВ РІДА-СОЛОМОНА НА ОСНОВІ АВТОМАТНИХ МОДЕЛЕЙ

Розглянута автоматна модель кодів Ріда-Соломона (РС) на основі теорії лінійної послідовнісної схеми. Дано теоретичне обґрунтування рекурентного і згорткового способів кодування кодів РС та пропонується їх почергове використання. Проведено аналіз складності виконання алгоритмів кодування при послідовній та паралельній реалізаціях.

Ключові слова: циклічні коди, коди Ріда-Соломона (РС), кодування, лінійна послідовнісна схема, згортка.

V. SEMERENKO
Vinnytsia National Technical University, Ukraine

ENCODING OF REED-SOLOMON CODES BASED ON AUTOMATON MODELS

Abstract – *The aim of the research – the theoretical ground of the encoding algorithms of Reed-Solomon (RS) codes with the using the finite automata in unbinary Galois fields – linear finite-state machine (LFSM). New determination of RS codes based on the automaton model is done and the peculiarities of the systematic encoding for two types recursive LFSM are considered. Usually the encoding of RS codes is executing by a recurrent method (step by step dividing by the generator polynomial of code) or a convolutional method (by means of the generator matrix or the checking matrix of code). The first method is very slow and the second method requires many equipment and program costs. The combined variant of encoding by the association of above-mentioned methods is suggested. It is possible to use a recurrent method of encoding of RS codes and to get an intermediate result after k units time and further during one unit time by a convolutional method to complete work. Spatial complexity of known convolution is a function from the parameter k of (n,k) RS code and spatial complexity of the offered convolution based on LFSR theory is a function from the parameter r of RS code (r=n-k). For widely-spread in practice the case r<<k the essential reduction of the complexity of encoder can be attained.*

Keywords: cyclic codes, Reed-Solomon (RS) codes, encoding, linear finite-state machine (LFSR), convolution.

Вступ

Як показав К. Шеннон в своїй знаменитій статті [1], використання завадостійких кодів в каналах з шумами дозволяє зменшити частоту помилок до прийнятного рівня. З тих пір було розроблено велику кількість різно-магнітних кодів для виявлення та виправлення помилок [2].

Достойне місце серед них займають циклічні коди, зокрема, їх підклас – коди Ріда-Соломона (РС). Сфера використання кодів РС вражає: супутниковий і мобільний зв'язок, цифрове телебачення, пристрої пам’яті (оптичні диски CD і DVD, дискові масиви RAID 6) та багато іншого [3].

Незважаючи на численні публікації за більш, ніж півстолітню історію цих кодів, ще залишається багато невирішених проблем. Однією з них є розробка ефективної процедури кодування кодів РС.

Аналіз проблеми

Завадостійке кодування реалізується через різноманітні технічні компроміси [2]. Теоретично можна виявити чи виправити будь-яку кількість помилок в даних, що передаються. Однак, підвищення коректувальної здатності коду вимагає збільшення ступеня надлишковості, тобто, зменшення частки корисної інформації в кожній порції переданих даних. В результаті знадобиться більше часу для передачі початкових даних з корисною інформацією. На практиці мінімізація часу передавання даних є важливою проблемою [4] і виникає питання лише про те, якою ціною вона може бути вирішена. Розглянемо цю проблему на алгоритмічному рівні, тобто на рівні алгоритмів кодування кодів РС.

Процес кодування коду РС, як і будь-якого іншого циклічного (n, k)-коду, полягає в тому, що k -розрядні інформаційні слова відображаються в n -розрядні кодові слова ($n > k$), які і передаються по каналу зв’язку. З позицій структури кодове слово Z може бути систематичним або несистематичним. Обмежимось розглядом лише систематичного кодового слова $Z = z_0, z_1, z_2, \ldots, z_{n-1}$, яке формується доданням до початкового k -розрядного інформаційного слова $\mathrm{I} = \iota_0, \iota_1, \iota_2, \ldots, \iota_{k-1}$ r -розрядного контрольного слова $\Psi = \psi_0, \psi_1, \psi_2, \ldots, \psi_{r-1}$ ($r = n - k$).

Для порівняння складності алгоритмів кодування будемо аналізувати їх часову та просторову асимптотичні складності [5].

З позицій реалізації алгоритму кодування відомі два основних способи формування контрольного слова Ψ : рекурентний та згортковий.

Суть рекурентного способу, який найчастіше використовується в каналах зв'язку [6], полягає в покроковому обчисленні слова Ψ з використанням одного із рекурсивних алгоритмів. Наприклад, при поліноміальному представленні циклічного коду алгоритм систематичного кодування полягає в помноженні інформаційного поліному $\iota(x) = \iota_0 + \iota_1 x + \iota_2 x^2 + \ldots + \iota_{k-1} x^{k-1}$ степеня k на одночлен x^r ($r = n - k$) і далі в покроковому діленні його на породжувальний поліном коду $g(x) = g_0 + g_1 x + \cdots + g_r x^r$ степеня r .

Отриманий в результаті ділення поліном остачі $\psi(x)$ займає молодші r розрядів кодового полінома $z(x)$ степеня n :

$$z(x) = \psi(x) + \iota(x), \quad GF(q) .$$

Таким чином, процедура систематичного кодування (n, k)-коду при його поліноміальному представленні завжди вимагає n тактів часу, тому часову складність такого способу кодування можна вважати лінійною $O(n)$. Для зберігання проміжних значень обчислень при систематичному кодуванні використовується r-розрядний регістр зсуву з лінійними оберненими зв'язками – РЗЛОЗ). Отже, просторова складність рекурентного способу кодування становить $O(r)$.

Згортковий спосіб кодування може бути реалізовано при представленні коду РС за допомогою породжувальної $(k \times n)$-матриці або перевірочної $(r \times n)$-матриці.

При використанні систематичної породжувальної матриці G_S i-а компонента z_i систематичного кодового слова Z обчислюється як результат одновимірної згортки

$$z_i = \sum_{j=0}^{k-1} w_{i,j} \times \iota_j , \quad GF(q), \quad \iota_j \in \mathrm{I}, \quad w_{i,j} \in G_S , \quad i = 0...n-1 . \tag{1}$$

При використанні систематичної перевірочної матриці H_S i-а компонента ψ_i контрольного слова Ψ обчислюється як результат одновимірної згортки

$$\psi_i = \sum_{j=0}^{k-1} h_{i,j} \times \iota_j , \quad GF(q), \quad \iota_j \in \mathrm{I}, \quad h_{i,j} \in H_S , \quad i = 0...r-1 . \tag{2}$$

Останній спосіб обчислень використовується в стандартах кодування DAT і CIRC (Cross Interlived Reed-Colomon Code – код РС з перемежуванням) для оптичних дисків [3].

Якщо всі компоненти інформаційного слова I та значення самих матриць G_S та H_S наперед відомі, тоді операції згортки (1) і (2) можуть бути виконані протягом одного такту часу (одного кроку), отже, часова складність обчислення одновимірної згортки буде константною і становитиме $O(1)$.

Для обчислення i-го компонента ($i = 1...n$) слова Z необхідно k вузлів множення та $(k-1)$ суматорів, тобто просторова складність обчислення всього слова Z згортковим способом за формулою (1) способом становитиме $O(nk^2)$.

Для обчислення i-го компонента ($i = 1...r$) слова Ψ необхідно k вузлів множення та $(k-1)$ суматорів, тобто просторова складність обчислення всього слова Ψ згортковим способом за формулою (2) способом становитиме $O(rk^2)$.

Відзначимо, що відомі різні оцінки складності обчислення згортки над полем $GF(q)$ [7]. Наприклад, швидкі способи обчислення згортки (1) і (2) мають просторову складність відповідно $O(nk\log k)$ і $O(rk\log k)$.

Таким чином, зменшення часової складності алгоритму кодування компенсується суттєвим підвищенням його просторової складності. В цьому проявляється один з фундаментальних принципів схемо-технічного проектування, і його не можна обійти. Задача полягає лише в знаходженні оптимального компромісу між перерозподілом складностей для різних технічних характеристик, який може бути реалізований на практиці.

Мета і задачі досліджень

Метою даної роботи є розробка методів кодування кодів РС на основі математичного апарату лінійних послідовнісних схем (ЛПС). Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Дати теоретичне обґрунтування процедури кодування кодів РС на основі їх автоматного представлення.

2. Дослідити компроміси між часовою та апаратною складністю різних процедур кодування в недвійкових полях Галуа та реалізувати швидке кодування кодів РС з прийнятною на практиці складністю

кодера.

Автоматні методи представлення кодів РС

Традиційно код РС, який дозволяє виправити $\tau_{\min}$ помилок, описується над полем $GF(q)$ породжувальним поліномом

$$g(x)=(x-\alpha)(x-\alpha^2)\ldots(x-\alpha^{2\tau_{\min}}),\qquad GF(q). \tag{3}$$

Для розв'язання поставленої задачі будемо використовувати автоматно-аналітичний спосіб представлення кодів РС на основі теорії ЛПС [8]. В цьому випадку ЛПС над полем $GF(q)$ (назвемо таку ЛПС символьною) задається функцією станів (переходів):

$$S(t+1)=A\times S(t)+B\times U(t),\quad GF(q) \tag{4}$$

і функцією виходів

$$Y(t)=C\times S(t)+D\times U(t),\quad GF(q),$$

де t – дискретний час; $A=\left\|a_{ij}\right\|_{r\times r}$, $B=\left\|b_{ij}\right\|_{r\times l}$, $C=\left\|c_{ij}\right\|_{m\times r}$, $D=\left\|d_{ij}\right\|_{m\times l}$ – характеристичні матриці; $S(t)=\left[s_i\right]_r$ – слово стану, $U(t)=\left[u_i\right]_l$ – вхідне слово, $Y(t)=\left[y_i\right]_m$ – вихідне слово.

Будемо використовувати ЛПС з одним входом і одним виходом ($l=1, w=1$), для якої функція виходу збігається з функцією стану: $Y(t)=S(t)$.

Будемо розрізняти автоматно-аналітичну і автоматно-графову моделі коду РС [9]. Оскільки символьна ЛПС, є кінцевим автоматом, тому як автоматно-графову модель коду РС можна вибрати граф переходів-виходів G_{FA} цього автомата. Автоматно-графова модель коду РС описана в [10].

До речі, формула для обчислення циклів на РЗЛОЗ в [11] безпосередньо випливає із функції (4) ЛПС, оскільки РЗЛОЗ – це найпростіший випадок ЛПС.

Проведемо детальний аналіз автоматно-аналітичної моделі коду РС, яка базується на характеристичних матрицях ЛПС.

Якщо породжувальний поліном (3) перетворити до вигляду

$$g(x)=\alpha_0^i+\alpha_1^i x+\alpha_2^i x^2+\ldots+\alpha_{2\tau_{\min}-1}^i x^{2\tau_{\min}-1}+x^{2\tau_{\min}},\ GF(q), \tag{5}$$

тоді можна отримати чотири типи символьних ЛПС: рекурсивні ЛПС типу Галуа, рекурсивні ЛПС типу Фібоначчі, нерекурсивні ЛПС типу Галуа та нерекурсивні ЛПС типу Фібоначчі.

Розглянемо лише перші два типи ЛПС, які використовуються для систематичного кодування кодів РС.

Рекурсивні ЛПС типу Галуа – це ЛПС, у яких сигнали на входи поступають з їх виходів, а характеристичні матриці мають вигляд:

$$A=\begin{vmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \alpha_0^i \\ \alpha^0 & 0 & \cdots & 0 & \alpha_1^i \\ 0 & \alpha^0 & \cdots & 0 & \alpha_2^i \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha^0 & \alpha_{d_{\min}-1}^i \end{vmatrix};\quad B=\begin{vmatrix} \alpha^0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \end{vmatrix},\ C=\begin{vmatrix} 0 & \ldots & 0 & \alpha^0 \end{vmatrix};\ D=\begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix}.$$

Рекурсивні ЛПС типу Фібоначчі – це ЛПС, у яких сигнали на входи поступають з їх виходів, а характеристичні матриці мають вигляд:

$$A=\begin{vmatrix} 0 & \alpha^0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha_0^i & \alpha_1^i & \alpha_2^i & \ldots & \alpha_{2\tau_{\min}-1}^i \end{vmatrix};\quad B=\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdots \\ \alpha^0 \end{vmatrix};\ C=\begin{vmatrix} \alpha^0 & 0 & \ldots & 0 \end{vmatrix};\quad D=\begin{vmatrix} 0 \end{vmatrix}.$$

Для кожного типу ЛПС структура всіх характеристичних матриць є стандартною і незмінною, за винятком одного рядка або стовпця, елементи яких ($\alpha_0^i, \alpha_1^i, \alpha_2^i, \ldots, \alpha_{2\tau_{\min}-1}^i$) визначаються коефіцієнтами породжувального полінома (5).

Кодування кодів РС за допомогою рекурсивних ЛПС

На основі автоматно-аналітичної моделі можна дати означення коду РС.

ОЗНАЧЕННЯ 1. Множина всіх двійкових послідовностей M довжини n, які переводять ЛПС із будь-якого початкового стану $S_{beg}(t)$ знову в стан $S_{beg}(t)$, утворює (n,k)-код РС Ω над полем Галуа $GF(q)$. Кожна така послідовність M є кодовим словом Z (n,k)-коду РС.

Виходячи із наведеного означення коду РС, задача кодування зводиться до знаходження такого кодового слова Z довжиною n, яке при подачі на входи ЛПС переводить її з деякого початкового стану

$S_{beg}(t)$, знову в цей же стан. Як початковий стан $S_{beg}(t)$ будемо надалі розглядати нульовий стан $S(0)$.

Розглянемо систематичне кодування циклічних кодів за допомогою рекурсивних ЛПС. Суть процедури кодування в цьому випадку буде такою.

Під дією на вхід інформаційного слова I ЛПС перейде з початкового стану $S(0)$ в деякий стан

$$S(k) = \begin{bmatrix} s_0^k \\ s_1^k \\ \dots \\ s_{r-2}^k \\ s_{r-1}^k \end{bmatrix}.$$

Далі необхідно визначити контрольне слово Ψ, яке переведе ЛПС із стану $S(k)$ знову в стан $S(0)$. В підсумку стане відомим кодове слово Z. Спочатку покажемо існування такого слова Ψ.

ТЕОРЕМА 1. Для рекурсивної ЛПС типу Галуа або типу Фібоначчі існує слово Ψ довжиною r, яке переводить ЛПС із стану $S(k)$ в стан $S(0)$.

Доведення. Згідно з [8] для будь-якої пари станів $S(i)$ і $S(j)$ існує вхідна послідовність із r символів, яка переводить r-вимірну ЛПС із $S(i)$ в $S(j)$, якщо ЛПС є r-керованою. А ЛПС буде r-керованою, якщо ранг $r \times r$-матриці

$$L_r = \left\lfloor A^{r-1} \times B, \quad A^{r-2} \times B, \quad \dots \quad , \quad A \times B, \quad B \right\rfloor \tag{6}$$

буде дорівнювати r. Підставляючи матриці A і B рекурсивної ЛПС типу Галуа в (6), отримаємо такий вигляд матриці L_r:

$$L_r^G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha^0 \\ 0 & 0 & \dots & \alpha^0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \alpha^0 & \dots & 0 & 0 \\ \alpha^0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Підставляючи матриці A і B рекурсивної ЛПС типу Фібоначчі в (6), отримаємо такий вигляд матриці L_r:

$$L_r^F = \begin{bmatrix} \alpha^0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ l_{2,1} & \alpha^0 & \dots & 0 & 0 \\ l_{3,1} & l_{3,2} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{r,1} & l_{r,2} & \dots & l_{r,r-1} & \alpha^0 \end{bmatrix}, \quad l_{i,j} = \{\alpha^0, \alpha^1, \dots, \alpha^{n-1}\}, i \neq j. \tag{8}$$

Ненульові значення діагональних елементів матриць (7) і (8) свідчать про те, що їх ранг дорівнює r. Отже, існує слово Ψ довжиною r, яке переводить ЛПС із стану $S(k)$ в довільний заданий стан, в тому числі і в стан $S(0)$. Теорема доведена.

$\perp$

Розглянемо кодування за допомогою рекурсивної ЛПС типу Галуа.

ТЕОРЕМА 2. Систематичне кодування (n,k)-коду РС за допомогою рекурсивної ЛПС типу Галуа може бути виконано або за $(k+1)$ тактів після подачі на її вхід інформаційного слова I, або за n тактів після подачі на її вхід інформаційного I і нульового O слів. В першому випадку компоненти ψ_i слова $\Psi = \{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_{r-2}, \psi_{r-1}\}$ можуть бути знайдені в результаті обчислення згортки

$$\psi_i = \sum_{j=0}^{r-1} a_{i,j} \times s_j^k, \quad GF(q), \tag{9}$$

де s_j^k – j-а компонента слова стану $S(k)$; $a_{i,j}$ – компоненти r-го степеня матриці A ($s_j \in S(k)$, $a_{i,j} \in A^r$, $i = 0 \dots r-1$, $j = 0 \dots r-1$);

а у другому випадку дорівнюють:

$$\psi_i = s_{r-1-j}^m, \tag{10}$$

де s^m_{r-1-j} – $(r-1-j)$-а компонента слова стану $S(m)$; ($s^m_{r-1-j} \in S(m)$, $j = 0 \ldots r-1$).

Доведення. Із теорії ЛПС [8] відомо, що при подачі на вхід ЛПС, яка знаходиться в деякому початковому стані $S(0)$, інформаційного слова I довжиною k ЛПС перейде в стан $S(k)$, що визначається з рівності

$$S(k) = A^k \times S(0) + L_k \times \mathrm{I}, \quad GF(q). \tag{11}$$

Якщо далі на вхід ЛПС подати контрольне слово Ψ довжиною r, тоді ЛПС перейде в стан $S(n)$, який визначається співвідношенням

$$S(n) = A^r \times S(k) + L_r \times \Psi, \quad GF(q). \tag{12}$$

Оскільки $S(n) = S(0)$, тому рівність (12) можна записати як

$$L_r \times \Psi = A^r \times S(k). \tag{13}$$

Підставляючи значення матриці L_r із (7) в (13), отримаємо згортку (9). Оскільки стан $S(k)$ буде отримано на k-му такті функціонування ЛПС, отже, контрольне слово Ψ може бути обчислено на $(k+1)$-му такті, і весь процес кодування виконується за $(k+1)$ тактів.

Продовжимо аналіз рівності (12). Якщо в цю рівність підставити значення $S(k)$ із (13), тоді отримаємо:

$$S(n) = A^r \times (A^k \times S(0) + L_k \times \mathrm{I}) + L_r \times \Psi =$$

$$= A^{k+r} \times S(0) + A^r \times L_k \times I + L_r \times \Psi = S(0) + A^r \times L_k \times I + L_r \times \Psi, \quad GF(q).$$

Добуток $L_k \times I$ визначає стан, в який перейде ЛПС після подачі на її вхід слова I, а добуток $A^r \times L_k \times I$ визначає деякий стан $S(m)$, в який перейде ЛПС після наступної подачі на її вхід нульового слова O довжиною r. Таким чином, значення слова стану $S(n)$ буде таким:

$$S(n) = S(0) + S(m) + L_r \times \Psi, \quad GF(q). \tag{14}$$

Оскільки метою кодування є перехід із початкового стану $S(0)$ знову в цей же стан, тому $S(n) = S(0)$, і тоді із виразу (14) випливає, що повинна виконуватися рівність $L_r \times \Psi = S(m)$.

Підставивши значення матриці L_r із (9), отримаємо:

$$\Psi = -S(m). \tag{15}$$

Знак «–» в (15) означає операцію векторної інверсії, тобто взаємної перестановки між молодшими і старшими компонентами слова.

В підсумку отримаємо співвідношення між компонентами слів $S(m)$ і Ψ, яке міститься в (10). Оскільки стан $S(m)$ буде отримано на n-му такті функціонування ЛПС, отже, контрольне слово Ψ може бути знайдено на n-му такті, і кодування виконується за n тактів. Теорема доведена.

$\perp$

Таким чином, процес кодування розбивається на два етапи. На першому етапі поступає інформаційне слово I, як правило, послідовно. Тому спочатку можна використати рекурентний спосіб кодування за формулою (6). Під дією слова I ЛПС протягом k тактів перейде з нульового стану $S(0)$ в стан $S(k)$.

На другому етапі кодування формується контрольне слово Ψ. Якщо це слово буде передаватись в канал також послідовно, тоді обчислити компоненти ψ_i можна рекурентним способом за r тактів. Якщо ж необхідно швидко, за один такт, обчислити слово Ψ і передати його в канал паралельно (наприклад, в комп'ютерній мережі), саме тоді знадобиться згортковий спосіб кодування.

ПРИКЛАД. Нехай над полем Галуа $GF(8)$ задано інформаційне слово

$$I = \left\lfloor \alpha^1 \quad \alpha^5 \quad \alpha^3 \quad \alpha^4 \quad \alpha^0 \quad \alpha^2 \quad \alpha^5 \quad \alpha^6 \quad \alpha^0 \quad \alpha^2 \quad \alpha^{12} \right\rfloor.$$

Для систематичного кодування використаємо (15,11)-код РС, якому відповідає породжувальний поліном

$$g(x) = (x-\alpha)(x-\alpha^2)(x-\alpha^3)(x-\alpha^4) = \alpha^{10} + \alpha^3 x + \alpha^6 x^2 + \alpha^{13} x^3 + x^4, \qquad GF(8)$$

та характеристичні матриці рекурсивної ЛПС типу Галуа:

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & \alpha^{10} \\ \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^3 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^{13} \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} \alpha^0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Перший етап кодування виконаємо рекурентним способом за формулою (4). В результаті ЛПС протягом 11 тактів перейде зі стану $S(0)$ в стан $S(11)$ (з метою економії місця будемо записувати стовпці станів ЛПС у вигляді рядків):

$$S(11) = \left\lfloor \alpha^9 \quad \alpha^3 \quad \alpha^4 \quad \alpha^{13} \right\rfloor.$$

Другий етап кодування виконаємо згортковим способом за формулою (9). Для цього знадобиться четверта степінь матриці A (її можна наперед підготувати і використовувати для будь-якого інформаційного слова цього коду):

$$A^4 = \begin{vmatrix} \alpha^{10} & \alpha^8 & \alpha^{11} & \alpha^{11} \\ \alpha^3 & \alpha^8 & \alpha^5 & \alpha^{13} \\ \alpha^6 & \alpha^7 & \alpha^{11} & \alpha^{13} \\ \alpha^{13} & \alpha^1 & \alpha^1 & \alpha^{10} \end{vmatrix}.$$

Тепер можна обчислити компоненти слова $\Psi = \left[\psi_0 \; \psi_1 \; \psi_2 \; \psi_3\right]$:

$$\psi_0 = \alpha^{10}\alpha^9 + \alpha^8\alpha^3 + \alpha^{11}\alpha^4 + \alpha^{11}\alpha^{11} = \alpha^{10}, \quad GF(8);$$

$$\psi_1 = \alpha^3\alpha^9 + \alpha^8\alpha^3 + \alpha^5\alpha^4 + \alpha^{13}\alpha^{11} = \alpha^0, \quad GF(8);$$

$$\psi_2 = \alpha^6\alpha^9 + \alpha^7\alpha^3 + \alpha^{11}\alpha^4 + \alpha^{13}\alpha^{11} = \alpha^{13}, \quad GF(8);$$

$$\psi_3 = \alpha^{13}\alpha^9 + \alpha^1\alpha^3 + \alpha^1\alpha^4 + \alpha^{10}\alpha^{11} = \alpha^1, \quad GF(8).$$

Аналогічним чином можна довести можливість згорткового кодування за допомогою рекурсивної ЛПС типу Фібоначчі.

Аналіз складності автоматно-аналітичного кодування кодів РС

На основі автоматних моделей для обчислення i-го компонента ($i = 1...r$) слова Ψ необхідно r вузлів множення та $(r-1)$ суматорів, тобто просторова складність обчислення всього слова Ψ згортковим способом за формулою (9) способом становитиме $O(r^3)$. Швидкий спосіб обчислення згортки (9) має просторову складність $O(r^2 \log r)$

Як було вже раніше показано, зменшити часову складність кодування можна тільки при згортковому способі кодування. Такий висновок базувався на припущенні, що такти часу при рекурентному та згортковому способах кодування приблизно однакові. Однак, останній спосіб вимагає великих апаратних витрат, відповідно, сумарна затримка всіх обчислювальних елементів може перевищити часові витрати рекурентного способу.

Відомі різні підходи до зменшення апаратних витрат у кодерах, наприклад, використання породжувальних поліномів з симетричними коефіцієнтами [12]. Але суттєво зменшити фізичний час виконання операції згортки можна лише при переході до паралельної обробки даних.

До речі, при рекурентному кодування паралелізм також використовується: значення окремих компонент ψ_i ($i = 1...r$) контрольного слова Ψ формуються одночасно. Для розв'язання такої ж задачі згортковим способом необхідно, щоб всі одновимірні згортки також обчислювались одночасно – це становитиме перший рівень паралелізму.

Другий рівень паралелізму має бути реалізовано при обчисленні самої згортки. Наприклад, для обчислення одновимірної згортки (9) знадобиться $(r-1)$ помножувачів та $(r-1)$ суматорів, які утворюють пірамідальну структуру. При реалізації помножувачів та суматорів на комбінаційній логіці [13], всі одновимірні згортки (1), (2) та (9) можуть бути обчислені протягом одного такту роботи кодера.

Обчислення згортки (1) або (2) за один такт вимагає попередньої наявності всього інформаційного слова I. Кількість m компонент слова I, яка може бути передана одночасно по каналу зв'язку, обмежена розрядністю l канальних шин ($l < k$). Це вимагатиме додаткового часу для підготовки до кодування слова I. Якщо ж компоненти слова I поступають послідовно, тоді кодування раціонально виконати рекурентним способом.

На практиці, враховуючи високу просторову складність згорток (1) і (2), їх реалізація, як правило, здійснюється програмно (наприклад, для оптичних дисків). В цьому випадку просторова складність обумовлена обсягом пам'яті для збереженням породжувальної або перевірної матриці (32 Кбіт для методу CIRC [3]).

Варто також врахувати, що використання вкорочених (n, k_1)-кодів РС ($k_1 < k$) в методі CIRC [3]) призводить до деякого спрощення реалізації згорток (1) і (2). Складність обчислення згортки (9) залишається незмінною, але автоматне представлення вкорочених кодів РС дозволяє швидше виконати операцію декодування [14].

Висновки

Завадостійке кодування кодів РС може бути виконане рекурентним або згортковим способом. Перший спосіб характеризується мінімальною просторовою складністю, однак вимагає найбільше часу.

Згортковий спосіб, навпаки, є найшвидшим при великих апаратних і програмних витратах.

Пропонується комбінований варіант кодування поєднанням зазначених вище підходів. На перших k тактах кодування (n,k)-коду РС можна використати рекурентний спосіб і отримати проміжний результат, а далі протягом одного такту згортковим способом завершити роботу. Просторова складність обчислення відомих згорток (1) і (2) є функцією від параметра k коду, а просторова складність запропонованої згортки (9) на основі теорії ЛПС є функцією від параметра r коду. Оскільки на практиці $r << k$, тому можна досягти суттєвого зменшення апаратних витрат при обчисленні згортки (9). Виграш у часі можна також отримати і при програмній реалізації кодування з використанням ЛПС.

При виборі способу кодування потрібно враховувати і спосіб введення і виведення даних в кодері. Запропонований спосіб буде оптимальним при послідовному (покомпонентному) вводі інформаційного слова і паралельному виведенні кодового слова. Якщо ж в кодері дані вводяться і виводяться лише послідовно, тоді доцільним буде лише рекурентне кодування на всіх n тактах роботи.

Література

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон – М. : Изд-во иностр. лит., 1963. – 829 с.

2. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. – 2-е изд., перераб. – М. : Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 1104 с.

3. Coding Theory and Cryptography. The Essentials / [D. R. Hankerson, D. G. Hoffman, D. A. Leonard, C. C. Lindner, and others]. Wall. Second Edition, Revised and Expanded. – New York : CRC Press, 2000. – 350 p.

4. Захарченко Н. В. Компенсація надлишковості в блокових коректуючих кодах за рахунок таймерних сигналів / Н. В. Захарченко, В. Й. Кільдішев, С. В. Хомич, О. Г. Пришляк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 2. – С. 175–181.

5. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1979. – 536 с.

6. Al Azad A. Efficient Hardware Implementation of Reed Solomon Encoder and Decoder in FPGA using Verilog / A. Al Azad, M. Huq, I. Rahman Rokon // International Conference on Advancements in Electronics and Power Engineering (ICAEPE'2011), Bangkok Dec., 2011. – P. 117–121.

7. Жуков И. А. Оценка сложности вычислений в конечных полях / И. А. Жуков, В. И. Кубицкий // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – № 2. – С. 21–27.

8. Гилл А. Линейные последовательностные машины / А. Гилл ; пер. с англ. – М. : Наука, 1974. – 288 с.

9. Семеренко В. П. Теорія циклічних кодів на основі автоматних моделей : монографія / В. П. Семеренко. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 444 с.

10. Семеренко В. П. Декодирование кодов Рида-Соломона на основе графовой и автоматной моделей / В. П. Семеренко // Электронное моделирование. – 2011. – № 1. – С. 57–72.

11. Лисицина Е. С. Исследование циклов генераторов на регистрах сдвига с обратными связями / Е. С. Лисицина // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 1. – С. 121–125.

12. Singh A. Design and Implementation of Reed Solomon Encoder on FPGA / A. Singh, M. Kaur // Intern. Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering. – 2013. – Vol. 7. – No. 9. – P. 33–39.

13. Вышенчук И. М. Алгоритмические операционные устройства и суперЭВМ / И. М. Вышенчук, Н. В. Черкасский. – К. : Тэхника, 1990. – 197 с.

14. Семеренко В. П. Параллельное декодирование укороченных циклических кодов / В. П. Семеренко // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. – 2012. – № 1. – С. 30–41.

Рецензія/Peer review : 23.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Роїк О.М.

УДК 629.34.0127 (043.3)

В.А. СІВАК
Національна академія Державної прикордонної служби ім. Б.Хмельницького

МЕТОДИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАЛЕЖНОСТІ КОМПОНЕНТІВ ДІАГНОСТИЧНИХ ЗАСОБІВ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТЕХНОЛОГІЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В даній статті розкрито сутність методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки. Визначено та розкрито специфіку використання автоматичного блоку постановки діагнозу агрегатів, механізмів та систем транспортних засобів із урахуванням заданих значень їх діагностичних параметрів. У статті висвітлена система терм-множин діагностичних параметрів, яка об'єктивно відображає закономірності формування значень діагностичних параметрів у реальних умовах експлуатації транспортних засобів і може бути використана при побудові термів діагностичних параметрів при проведенні експрес-контролю транспортних засобів в умовах їх використання для виконання завдань з охорони державного кордону.

Ключові слова: діагностичні засоби, нечіткі терм-множини, кластеризація, транспортні засоби.

V.A.SIVAK
National Academy of State Borderguard service of Ukraine named after B. Khmelnytskyi

METHODS OF FUNCTIONAL COMPONENTS FACILITIES OF DIAGNOSTIC TOOLS, WHICH USE FUZZY LOGIC TECHNOLOGY

This article reveals the essence of methods of components functional facilities of diagnostic tools, which use fuzzy logic technology . It was identified and disclosed, the specific use of automatic block diagnosis units, mechanisms and systems of vehicles with the current values of diagnostic parameters. In the article the system of term-sets of diagnostic parameters, which objectively reflect the regularities of formation of values of diagnostic parameters in real operation conditions of vehicles and can be used to construct terms of diagnostic parameters for carrying out express control of vehicles in terms of their use for performing tasks for the protection of the state border.

Keywords: Diagnostic tools, the fuzzy term set, clustering, vehicles.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Стабільне існування України як суверенної держави, вимагає захисту її кордонів. Це завдання покладено на підрозділи та органи Державної прикордонної служби України (ДПСУ), які згідно вимог чинного законодавства здійснюють як охорону так і оборону державного кордону [1].

В той же час, для забезпечення оперативності та мобільності несення підрозділами та органами ДПСУ прикордонної служби, залучається достатня кількість штатних сучасних транспортних засобів (ТЗ). Так для потреб прикордонників в сучасних, маневрених та мобільних ТЗ, тільки в період з 2012 по 2015 рік було закуплено та отримано в рамках міжнародної технічної допомоги понад 660 од. ТЗ та спеціальної техніки на загальну суму близько 292 млн. грн., при цьому, процес оновлення парку техніки триває [2].

На превеликий жаль, в процесі використання даних ТЗ і СТ за призначенням актуальною постає проблематика із дотримання їх безпечної експлуатації при виконанні оперативно-службових та службово-бойових завдань з охорони державного кордону, що до цих пір на жаль науково та концептуально не обгрунтовано. Сумна статистика дорожньо-транспортних пригод та подій з ТЗ за останніх 5 років, як на службовому так і на особистому транспорті свідчить про недосконаліть процесу забезпечення безпеки експлуатації ТЗ персоналом ДПСУ і як результат, за останні 5 років у ДПСУ сталося біля 225 ДТП, в яких загинув 51 чоловік та 110 чоловік було травмовано, а також пошкоджено більш, як 56 одиниць службових ТЗ [3].

В рамках вирішення проблематики забезпечення безпечної експлуатації ТЗ підрозділами і ООДК та з метою підвищення рівня контролю технічного стану даних ТЗ, автором досліджується можливість застосування методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми та на які опирається автор. Дослідження питань використання технології нечіткої логіки в діагностичних системах ТЗ, в процесі їх експлуатації, здійснювалось в наукових працях таких відомих вчених, як Варфоломєєв В.Н., Васільєв В.І., Гордієнко Е.К. та інші [4, 5]. Однак існує необхідність розкрити можливість використання технології нечіткої логіки, як основи застосування відомих методів побудови функцій належності компонентів діагностичних засобів в площині специфіки вирішення проблеми забезпечення безпеки експлуатації ТЗ, в умовах виконання завдань з охорони державного кордону.

Метою даної статті є розкриття сутності методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки, а також визначення специфіки використання автоматичного блоку постановки діагнозу агрегатів, механізмів та систем транспортних засобів із урахуванням заданих значень їх діагностичних параметрів.

Викладення основного матеріалу дослідження. В рамках теоретичного аспекту розробленої та запропонованої автором Концепції забезпечення безпечної експлуатації ТЗ підрозділів та органів ДПСУ в

умовах охорони державного кордону, сутність якої викладена у матеріалах [6], для підвищення рівня контролю технічного стану ТЗ підрозділів та ООДК пропонується використовувати удосконалені методи поглибленого діагностування агрегатів та систем ТЗ та обґрунтування діагностичних нормативів експлуатаційної безпеки ТЗ. Разом з тим, в рамках впровадження нових інформаційних технологій у вирішення проблеми забезпечення експлуатаційної безпеки ТЗ, необхідно розглянути сутність та можливість використання методів функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки.

Досвід використання технології нечіткої логіки в діагностичних системах, які давно та успішно застосовуються в предметних галузях авіації, космонавтики, медицини, морському, залізничному транспорті, дає підстави вважати, що найбільш доцільним об'єктом для застосування нечіткої логіки є блок автоматичної постановки діагнозу [7, 8]. Як правило, він має структуру, яка зображена на рис.1

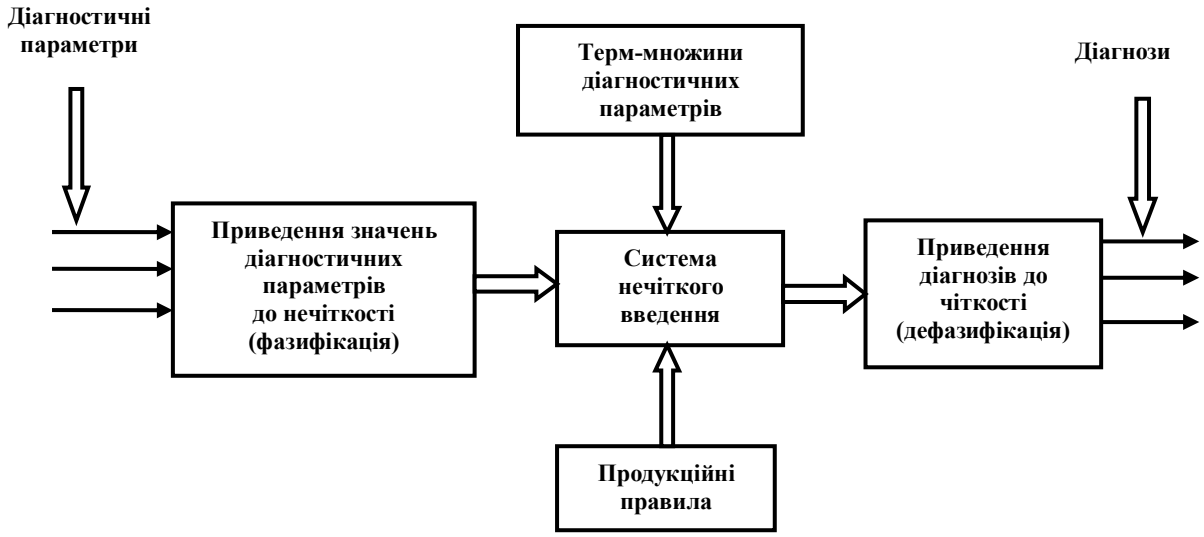


Рис. 1. Структура блоку автоматичної постановки діагнозу звикористанням технології нечіткої логіки

Як відомо, в основі теорії нечіткої логіки лежать поняття нечіткої і лінгвістичних змінних, а також нечітких множин. Поняття нечіткої та лінгвістичної змінних використовуються при описі об'єктів та явищ за допомогою нечітких множин [9].

Нечітка змінна характеризується трійкою $<\alpha, X, A>$, де α – найменування змінної; X – універсальна множина (галузь визначення α); A – нечітка множина на X, що описує обмеження на значення нечіткої змінної α.

Лінгвістичною змінною (ЛП) називається набір $< \beta, T, X, G, M >$, де β – найменування лінгвістичної змінної; T – безліч її значень (терм-множин) найменування, що представляють собою, нечіткі змінні, областю визначення кожної з яких є множина X. Множина T називається базовою терм-множиною лінгвістичної змінної; G – синтаксична процедура, що дозволяє оперувати елементами терм-множин T, зокрема, генерувати нові терми (значення). M – семантична процедура, що дозволяє перетворити кожне нове значення лінгвістичною змінною, яке утворене процедурою G, у непарну змінну, тобто сформувати відповідну нечітку множину.

Нечітка підмножина A відрізняється від звичайного тим, що для елементів x з E (універсальна множина) немає однозначної відповіді «ТАК-НІ» щодо властивості R. У зв'язку із цим нечітку підмножину A універсальної множини E визначається як безліч упорядкованих пар $A=\{\mu A(x)/x\}$, де $\mu A(x)$ – характеристична функція належності (або просто функція належності), що ухвалює значення в деякім цілком упорядкованій множині M (наприклад, $M = [0,1]$).

Функція належності вказує ступінь (або рівень) належності елемента x підмножині A. Множину M називають множиною належностей.

Якщо $M = \{0,1\}$, то нечітка підмножина A може розглядатися як звичайна або чітка множина.

Наприклад, треба визначати частоту обертання колінчатого валу двигуна (або навантаження на вал) за допомогою понять «Низька», «Середня», «Висока», при цьому діапазон зміни частоти від 1000 об/хв до 5000 об/хв. У цьому випадку лінгвістична змінна може виглядати у такий спосіб: β – частота обертання; T – {«Низька», «Середня», «Висока»}; X – [1000, 5000]; G – процедура утворення нових термів; M – процедура завдання на $X = [1000, 5000]$ нечітких множин A_1 = «Низька», A_2 = «Середня», A_3 = «Висока», а також нечітких множин для термів з $G(T)$ відповідно до правил трансляції нечітких множин.

При цьому терм-множину і розширена терм-множину можна характеризувати функціями належності, наприклад, як на рис. 2, 3.

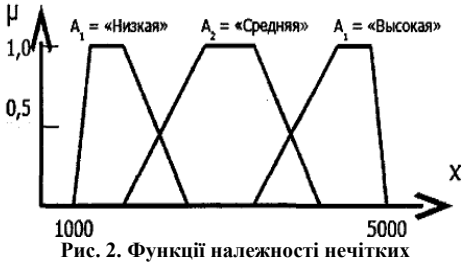


Рис. 2. Функції належності нечітких множин A1, A2, A3

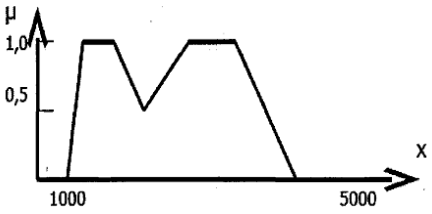


Рис. 3. Функція належності нечітких множин «Низька або середня» = A1 U A2

Після фазифікації (приведення до нечіткості) вихідних даних про частоту обертання, одержуємо ступені належності конкретних (точних) значень до того або іншого терму (дані оберти «Низькі» зі ступенем належності 0,9).

Визначаючи подібним чином сукупність діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан об'єкта, можна поставити діагноз з оцінкою його вірогідності.

Існує понад десяток типових форм кривих для завдання функцій належності [10]. Найбільше поширення одержали трикутна та трапецеїдальна функції належності.

Трикутна функція належності визначається трійкою чисел (*a, b, c*), а її значення в точці x обчислюється згідно з виразом:

$$MF(x) = \begin{cases} 1 - \dfrac{b-x}{b-a}, a \le x \le b \\ 1 - \dfrac{x-c}{c-b}, b \le x \le c \\ 0, \textit{в інших випадках} \end{cases}, \quad (1)$$

При $(b-a) = (c-b)$ маємо випадок симетричної трикутної функції належності, яка може бути однозначно задана двома параметрами із трійки (*a, b, c*).

Аналогічно для завдання трапецеїдальної функції належності необхідна четвірка чисел (*a, b, c, d*):

$$MF(x) = \begin{cases} 1 - \dfrac{b-x}{b-a}, c \le x \le b \\ 1, \qquad b \le x \le c \\ 1 - \dfrac{x-c}{d-c}, c \le x \le d \\ 0, \textit{в інших випадках} \end{cases}, \quad (2)$$

При $(d-a) = (d-c)$ трапецеїдальна функція належності ухвалює симетричний вид.

Основою для проведення операції нечіткого логічного виводу є база продукційних правил, що містить нечіткі висловлення у формі «ЯКЩО-ТО», а також функції належності для відповідних лінгвістичних терм.

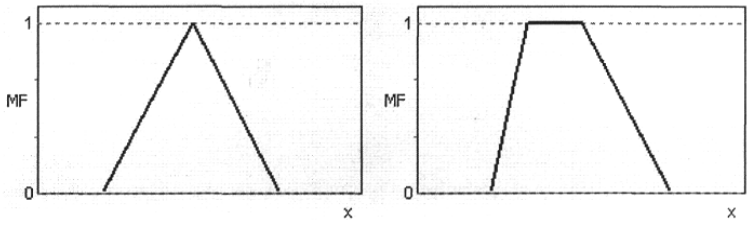


Рис. 4. Типові кусочно-лінійні функції належності

Розглянемо докладніше нечіткий вивід на прикладі механізму Мамдани (Mamdani). Це найпоширеніший спосіб логічного виводу в діагностичних нечітких системах. У ньому використовується мінімаксна композиція нечітких множин. Даний механізм містить у собі наступну послідовність дій (рис. 1):

процедура фазифікації: визначаються ступені істинності, тобто значення функцій належності для лівих частин кожного правила (передумов). Для бази правил з *m* правилами позначимо ступені істинності як $A_{ik}(xk)$, i = l..m, k = l..n; нечіткий вивід. Спочатку визначаються рівні «відсікання» для лівої частини кожного з

правил: alfai = mini ($A_{ik}(xk)$).

Далі знаходиться «усічені» функції належності: *B*(*y*) = *mini*(*alfai Bi*(*y*)), композиція, або об'єднання отриманих усічених функцій, для чого використовується максимальна композиція нечітких множин: *MF*(*y*) = *maxi* (*B*(*y*)), де *MF*(*y*) – функція належності підсумкової нечіткої множини; дефазифікація, або

приведення до чіткості. Існує кілька методів дефазифікації. Наприклад, метод середнього центру, або центроідний метод. Геометричний зміст такого значення - центр ваги для кривої *MF*(*y*). На рис. 5 графічно показано процес нечіткого виводу по Мамдані для двох вхідних діагностичних параметрів і двох нечітких правил *R*1 і *R*2.

В цих умовах, найбільш важкою проблемою при побудові нечітко логічних систем є проблема побудови терм – множин. Найчастіше вони будуються методом прямого або непрямого експертного опитування, що вносить значну частку суб'єктивності в розроблювальну систему [11].

У той же час специфіка організації процесів діагностування агрегатів і систем ТЗ і прийнята в провідних країнах світу концепція використання діагностичної інформації для керування процесами технічної експлуатації та ремонту ТЗ на автотранспортних підприємствах, забезпечує нагромадження великого обсягу цієї інформації.

Наявність такої інформації дозволяє в більшості випадків відмовитися від експертного методу побудови термів і перейти до більш досконалої й обґрунтованої послідовності їх побудови.

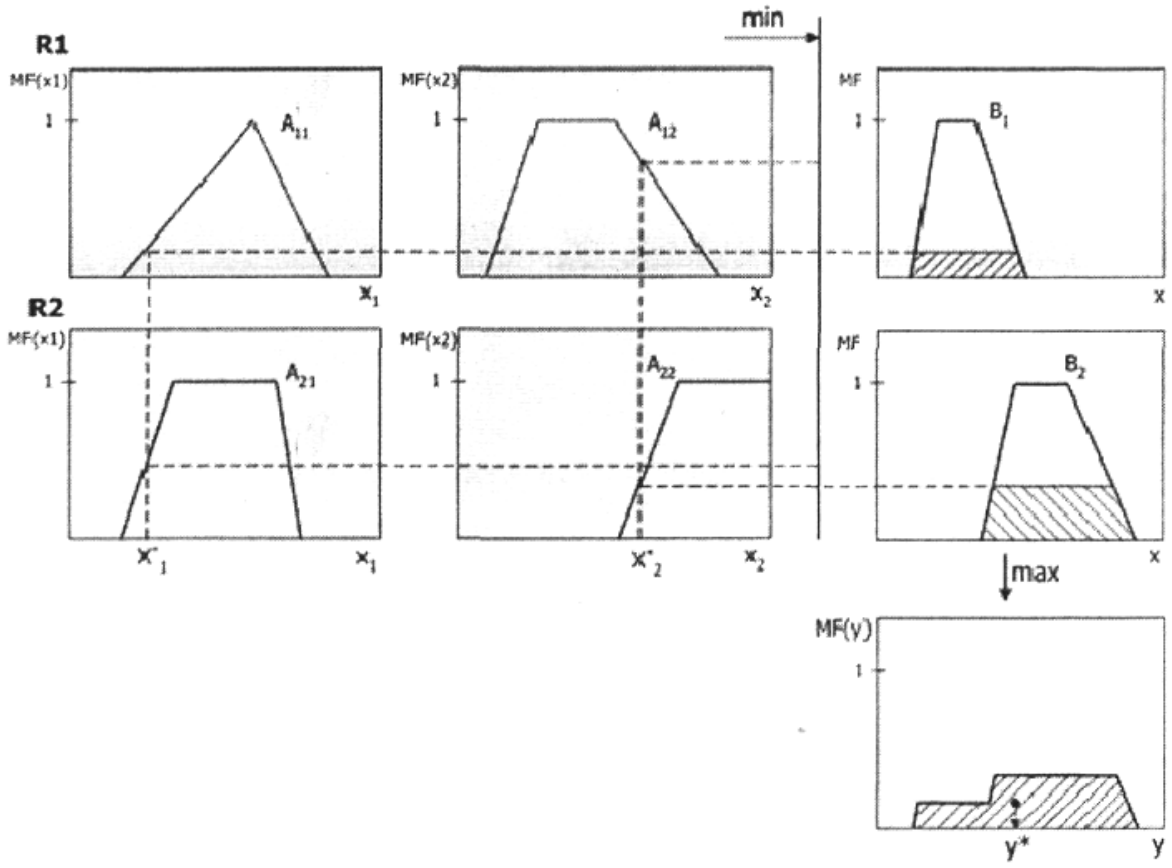


Рис. 5. Схема нечіткого виводу по Мамдані

Запропонована послідовність формування термів діагностичних параметрів містить у собі наступні етапи:

1. Формується база даних з комплексу діагностичних параметрів $\{Si\}$.

2. Використовуючи методи кластерного аналізу, за базою експериментальних даних визначаються кластери кількісних значень у діагностичних параметрах $\{Sij\}$.

При цьому, кластеризацію рекомендується проводити на основі використання неймережі Кохонена, відмінною рисою якої виявляється можливість самонавчання тільки на основі вектора вхідних даних.

Мережі Кохонена є типовим представником мереж, що вирішують завдання класифікації без вчителя. Мережа автоматично розбиває безліч експериментальних даних в n-мірному просторі на класи, близькі за змістом до «квадрата евклідової відстані», тобто в якості міри близькості використовується «евклідова міра»:

$$d(x,w_i) = \| x - w_i \| = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} (x_j - w_{ij})^2} , \quad (3)$$

Таким чином, кількість кластерів визначається нейромережею автоматично, що дуже важливо при розробці нових методів діагностування, коли закономірності поведінки діагностичних параметрів ще слабо вивчені.

В ході практичної реалізація даного етапу зручно використовувати нейромережу Кохонена з

аналітичним пакетом Deductor Studio Lite 4.2 фірми «Basegroup». В цьому випадку, результати кластеризації представляються у графічному виді (приклад наведений на рис. 6), а також у вигляді кількісних характеристик кожного із кластерів. Кожна експериментальна точка відображається на карті Кохонена у вигляді гнізда, яке пофарбовано в колір, який співвідноситься з величиною даного параметра. З рис. 6 видно, що експериментальні значення діагностичного параметра *T* (час спрацьовування гальмового приводу) автоматично розділені нейромережею на три кластери.

3. Визначаються мінімальне $S_i\ min$ і максимальне $S_i\ max$ значення параметрів, що потрапили в кожний *i*-тий кластер. Визначається також і центр кожного кластера *Sic*.

4. Кількість термів параметру приймається рівним кількості отриманих кластерів. При цьому, вид функції належності переважно приймати у вигляді трапецеїдальної форми.

При побудові функцій належності, необхідно розглядати впорядковану множину термів Т. Дана процедура означає, що терм, який має носій, розташований лівіше на дійсній осі, одержує менший номер. Для впорядкування множини Т використовуємо вираз:

$$(\forall T_i \in T)(\forall T_j \in T)(i > j \leftrightarrow (\exists x \in C_i)(\forall y \in C_i)(x > y)). \quad (4)$$

При цьому, терм-множини розглянутих лінгвістичних змінних повинні задовольняти наступним умовам:

$$(\forall \beta)\mu C_i(x') = 1, \mu C_m(x'') = 1; \quad (5)$$

$$(\forall \beta)(\forall T_i \in T \setminus \{T_m\})(0 < \sup \mu C_i \cap C_{i+1}(x) < 1); \quad (6)$$

$$(\forall \beta)(\forall T_i \in T)(\exists x \in X)(\mu C_i(x) = 1); \quad (7)$$

$$(\forall \beta)(\exists x'' \in R_i)((\forall x \in X)(x' < x < x'')). \quad (8)$$

Інтерпретація виразів (5) – (8) полягає у наступному.

Умова (5) підкреслює, що функції належності крайніх термів лінгвістичних змінних не можуть мати симетричну форму, що обумовлене розташуванням цих термів в упорядкованій множині *T*.

Умова (6) обмовляє неприпустимість у базовій множині *T*-термів нерозрізнених термів.

Умова (7) указує на те, що кожне поняття має хоча б один типовий об'єкт, який позначується цим поняттям. Тому неприпустимо сполучення на одному відрізку шкали функцій належності з різною висотою $d = max\ \mu(x)$. Передбачається використання нормальних нечітких множин з висотою $d = 1$.

Умова (8) обумовлює обмеженість області визначення Х кінцевою множиною точок.

5. Будуються нечіткі множини, що описують кожний терм діагностичних параметрів. Перший терм кожного параметра задається функцією належності виду:

$$F_{ij}(S) = \begin{cases} 1.0, & якщо\ s \le S_{11} \\ \dfrac{s - S_{12}}{S_{11} - S_{12}}, & якщо\ S_{11} < s < S_{12} \\ 0, & якщо\ s \ge S_{12} \end{cases}. \quad (9)$$

Останній r-терм кожного j-го параметра визначається функцією належності виду:

$$F_{ij}(S) = \begin{cases} 0, & якщо\ s \le S_{i1} \\ \dfrac{s - S_{r1}}{S_{r2} - S_{r1}}, & якщо\ S_{r1} < s < S_{r2} \\ 1.0, & якщо\ s \ge S_{r2} \end{cases}. \quad (10)$$

Для обчислення нечітких *i*-х термів, що розташовані між першим (лівим) та останнім (правим) термом, використовується формула:

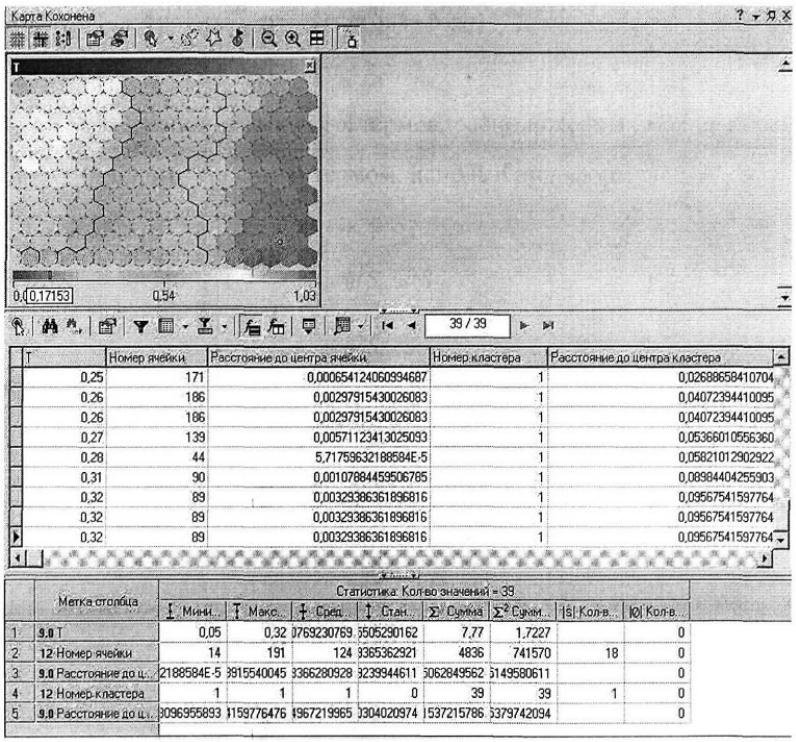
$$F_{ij}(S) = \begin{cases} 0, & якщо\ s \le S_{i1} \\ \dfrac{s - S_{i1}}{S_{i2} - S_{i1}}, & якщо\ S_{i1} < s < S_{i2} \\ \dfrac{s - S_{i4}}{S_{i3} - S_{i4}}, & якщо\ S_{i3} < s < S_{i4} \\ 0, & якщо\ s \le S_{i4} \end{cases}. \quad (11)$$

При визначенні опорних точок термів слід дотримуватися наступних умов:

1. Для першого терму: $S_{11} = S_{1max} - \delta$, де S_{1max} – верхня межа першого кластера, а (δ – похибка виміру діагностичного параметру; $S_{12} = S_{c2}$, де S_{c2} – центр другого кластеру.

2. Для останнього терму: $S_{r2} = S_{r\ min} + \delta$, де $S_{r\ min}$ – нижня межа останнього кластеру; $S_{r1} = S_{(r-2)4} = S_{c(r-1)}$, де $S_{c(r-1)}$ – центр передостаннього кластеру.

3. 3. Для *i*-х кластерів, що розташовані між першим і останнім кластером: $S_{i1} = S_{(i-2)4} = S_{c(i-1)}$; $S_{i2} = S_{i\ min} + \delta$; $S_{i3} = S_{i\ max} - \delta$; $S_{i4} = S_{c(i+1)}$, де $S_{i\ min}$ та $S_{i\ max}$ відповідно нижня і верхня межа *i*-го кластеру, а $S_{c(i-1)}$ і $S_{c(i+1)}$ – центри (i - 1) та (i + 1) кластерів.



T	Номер ячейки	Расстояние до центра ячейки	Номер кластера	Расстояние до центра кластера
0,25	171	0,000654124060994687	1	0,02688658410704
0,26	186	0,00297915430026083	1	0,04072394410095
0,26	186	0,00297915430026083	1	0,04072394410095
0,27	139	0,00571123413025093	1	0,05366010556360
0,28	44	5,71759632188584E-5	1	0,05821012902922
0,31	90	0,00107884459506785	1	0,08984404255903
0,32	89	0,00329386361896816	1	0,09567541597764
0,32	89	0,00329386361896816	1	0,09567541597764
0,32	89	0,00329386361896816	1	0,09567541597764

	Метка столбца	Статистика: Кол-во значений = 39							
		Мини...	Макс...	Сред...	Стан...	Сумма	Σ² Сумм...	|δ| Кол-в...	|0| Кол-в...
1	9,0 T	0,05	0,32	0769230769	5505290162	7,77	1,7227		0
2	12 Номер ячейки	14	191	124	3865362921	4836	741570	18	0
3	9,0 Расстояние до ц...	21885B4E-5	9915540045	3366280928	3239944611	0052849562	5149580611		0
4	12 Номер кластера	1	1	1	0	39	39	1	0
5	9,0 Расстояние до ц...	3096955893	3159776476	1967219965	0304020974	1537215786	5379742094		0

Рис. 6. Приклад кластеризації значень діагностичного параметру «Час спрацьовування гальмівного приводу» нейромережею Кохонена

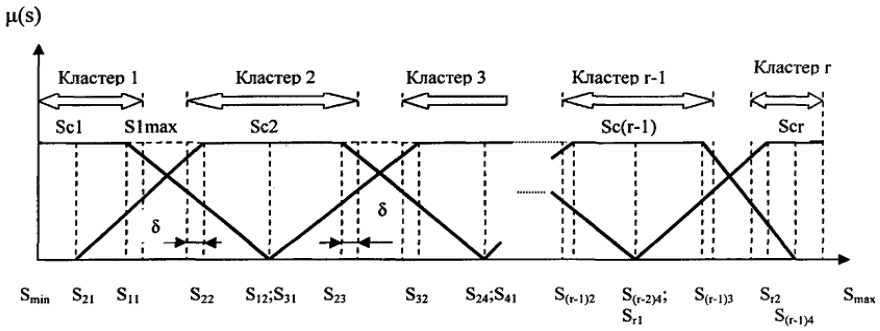


Рис. 7. До процесу формування термів діагностичних параметрів на основі кластеризації

Висновки

Таким чином, отримана система терм-множин діагностичних параметрів об'єктивно відображає закономірності формування значень діагностичних параметрів у реальних умовах експлуатації транспортних засобів. Відповідно, дані методи можуть бути використані при побудові термів діагностичних параметрів при проведенні експрес-контролю транспортних засобів в умовах їх використання для виконання оперативно-службових завдань з охорони державного кордону.

Література

1. Закон України «Про Державну прикордонну службу України» // Відомості Верховної Ради. – 2003. – № 27. – Ст. 208.

2. Букоємський С.Л. Про стан та перспективи технічного забезпечення ДПСУ за 2014 та вісім місяців 2015 року : доповідь на зборах керівного складу інженерно-технічних підрозділів РУ та органів ДПСУ / С.Л. Букоємський // Матеріали зборів керівного складу інженерно-технічних підрозділів Державної прикордонної служби України. – К. : АДПСУ, 2015. – 32 с.

3. Сівак В.А. Аналіз сучасного стану забезпечення безпеки експлуатації транспортних засобів органів охорони державного кордону / О.Й.Мацько, В. А. Сівак // Труди університету. – К. : Видавництво НУОУ, 2015. – № 3(130). – С. 207–210.

4. Васильев В.И. Метод обучаемых деревьев решений в задачах синтеза алгоритмов автоматической постановки диагноза систем автомобиля / В.И. Васильев, Я.А. Борщенко // Вестник МАДИ (ГТУ). – 2006. – № 6. – С. 91–92.

5. Гордиенко Е.К. Искусственные нейронные сети. Основные определения и модели / Е. К. Гордиенко, А. А. Лукьяница // Техническая кибернетика. – 1994. – № 5. – С. 79–92.

6. Сівак В.А. Концепція безпечної експлуатації транспортних засобів в умовах охорони державного

кордону / В.А. Сівак // Збірник наукових праць НАДПСУ. Серія: військові і технічні науки: наукове видання. –Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2015. – № 2(64). – С. 76–82.

7. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / Станислав Оссовский ; пер. с пол. И. Д. Рудинского. – М. : Финансы и статистика, 2004 (Великолук. гор. тип.). – 343 с.

8. Плахтеев А.П. Архитектура вычислительных средств мехатронных систем на автомобильном транспорте / А.П. Плахтеев // Автомобильный транспорт в XXI веке : материалы международной научно-технической конф. – Харьков, 2003. – С. 68–70.

9. Гурко А.Г. Перспективы использования нечеткой логики в системах управления движением транспортными средствами / А. Г. Гурко // Автомобильный транспорт в XXI веке : материалы международной научно-техническая конференции. – Харьков, 2003. – С. 66–68.

10. Димитров В.П. Особенности построения функций принадлежности лингвистических переменных предметной области «Технологическая настройка /В.П. Димитров, Л.В. Борисова // Вестник ДГТУ. – Ростов-на-Дону, 2005. – Т. 5. № 5(27). – С. 653–660.

11. Тарасик В.П. Интеллектуальные системы управления транспортными средствами / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Минск : УП «Технопринт», 2004. – 512 с.

Рецензія/Peer review : 15.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., професор Андрощук О.С.

УДК 621.22

С.А. РУСАНОВ, Д.О. ДМИТРІЄВ, О.О. ЛОБОВ, П.П. РЕМІЗОВ
Херсонський національний технічний університет

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕУ «КАСКАД-3» І ЗМІШАНІ ЗАДАЧІ В АЛЬТЕРНАТИВНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

В статті розглянуто питання, пов'язані з моделюванням аеродинаміки вітроенергетичної установки «КАСКАД-3». За запропонованою авторами методикою розрахована прогнозована потужність обладнання. Отримана картина розподілення моментів на валу установки, отримані характеристики обладнання. В статті обговорюється питання класифікації аналогічних зовнішніх, внутрішніх та змішаних задач гідро- та аеродинаміки. Детально розглядається методика чисельних розрахунків – від виділення доменів до формування сітки геометрії. Результат співставляється з експериментальними даними.

Ключові слова: аеродинаміка, вітроенергетика, моделювання.

S.A. RUSANOV, D.O. DMITRIEV, O.O. LOBOV, P.P. REMIZOV
Kherson National Technical University

ENERGY CHARACTERISTICS WIND POWER INSTALLATIONS "CASCADE-3" AND THE MIXED PROBLEM IN THE ALTERNATIVE ENERGY

The article deals with issues related to the modelling of aerodynamics wind power installations "CASCADE-3." The projected capacity of the equipment is calculated with a help of method proposed by the authors. The result is the distribution of points on the shaft installations, equipment specifications are obtained. In discussing the problem there are classification of similar problems as external, internal and mixed problems hydro- and aerodynamics. The technique of numerical calculations is considered in detail – from the selection of domains to form mesh geometry. The result is compared with experimental data.

Keywords: aerodynamic, wind power installations "CASCADE-3", modelling.

Вступ. Вітроенергетика в розвинених країнах відіграє значну роль як частина енергетичних систем, при цьому в деяких країнах вона є однією з головних складових альтернативної енергетики [1]. Відомо [2], що одною з найбільших перешкод для використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) є їх висока вартість. Широкий спектр типів ВЕУ передбачає значні витрати ще на проектних етапах, а в питомих показниках це особливо помітно для малих ВЕУ, де відношення до вартості виготовлення дослідних зразків буде значним. Вартість проектних робіт можна знизити за рахунок використання чисельних розрахунків в системах, які цільовим чином призначені для розрахунків ВЕУ [3], так і в універсальних CFD програмах, таких як ANSYS CFX, ANSYS Fluent, Autodesk Simulation CFD, Comsol Multiphysics та ін.

Крім того, багато задач вітроенергетики представляють не тільки практичний, але і теоретичний інтерес. Наприклад, відомо про поділ гідро- і газодинамічних задач на зовнішню, внутрішню і змішану [4], при цьому змішана задача розуміється як рух рідини або газу всередині каналів складної форми з одночасним обтіканням тіл. Змішана задача зазвичай розглядається стосовно до руху рідини крізь, наприклад, зернистий шар твердого матеріалу, коли вона переміщується як всередині каналів між частинками, так і одночасно обтікає тверді частинки – ці умови спостерігаються в процесах фільтрування, масопередачі в апаратах з насадками і т. д. Однак умови для змішаної задачі спостерігаються і в галузі альтернативної енергетики при роботі заглибних вільнопотокових осьових лопатевих турбін для малих і мікро ГЕС [5], при роботі ВЕУ з повітро-відвідними пристроями (дифузорному, конфузорному, комбінованими) [1]. У таких пристроях основний потік розділяється на дві складові – внутрішню, що

проходить безпосередньо через установку, і зовнішню, яка її обтікає.

Постановка задачі. Єдиної методики розрахунку зазначених вище пристроїв не існує, що обумовлено не тільки складністю завдання, але й широким переліком обладнання, яке відповідає зазначеній галузі. В [5] нами була запропонована методика чисельного моделювання стосовно до занурених гідродинамічних пристроїв. Представляють інтерес відповідні розрахунки для проблем ВЕУ, в яких реалізується змішана задача.

Викладення основного матеріалу. Далі представлені результати застосування подібних розрахунків в рамках науково-дослідної роботи "Розрахунок очікуваних показників потужності оригінальної повітряної енергоустановки каркасного типу "КАСКАД-3", проведеної на кафедрі «Основи конструювання» Херсонського національного технічного університету, з теоретичними розрахунками за договором ГР №02/14 по компоновці і розмірам замовника. Вітроенергетична установка являла собою каркасну конструкцію вертикально-осьового типу з конфузорним повітропровідним пристроєм (розробник Ремізов П.П. [6]). Загальна задача була розбита на кілька етапів: спрощена 2D модель використана для отримання початкових базових даних по роботі ВЕУ, 2D модель з вільним простором навколо ВЕУ, повна 3D модель ВЕУ. Розрахункова область для останніх двох випадків складалася з трьох підобластей: вільного простору навколо ВЕУ, внутрішнього стаціонарного простору ВЕУ і кругової області, що охоплює лопатки, для завдання обертового розрахункового домену. Додатковими розрахунками була також зроблена оцінка аеродинамічного опору корпусу ВЕУ з конфузором без врахування обертового домену. Розрахункова сітка для повної 3D моделі ВЕУ налічувала понад 3 млн. осередків, сіткова незалежність була перевірена шляхом виконання розрахунків для одного з режимів на більш густішій і більш розрідженій сітках. Використовувалася стандартна k-ε модель турбулентності з масштабованими пристінковий функціями. Граничні умови враховували специфіку завдання: на вході в розрахункову область задавалася середня швидкість набігаючого повітряного потоку, задавалися також умови симетрії для центральної частини, вихід в атмосферу. На стінках задавалася гранична умова No Slip Wall.

Відповідно до розрахункової методики [5] початковий розрахунок проводився для нульової кутової швидкості ротора (примусове заклинювання ротора), з метою визначення максимальних моментів, що діють на вісь ротора. Розрахунок показав значну чутливість рішення до поточного куту повороту ротору барабану (рис. 1, від'ємні значення моменту відповідають необхідному напрямку обертання), що характерно для вертикально-осьових вітроустановок.

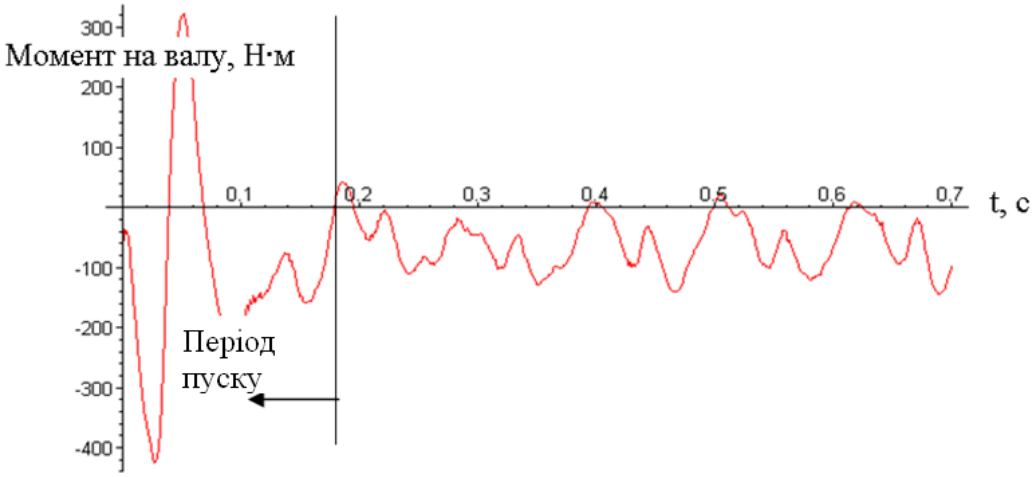
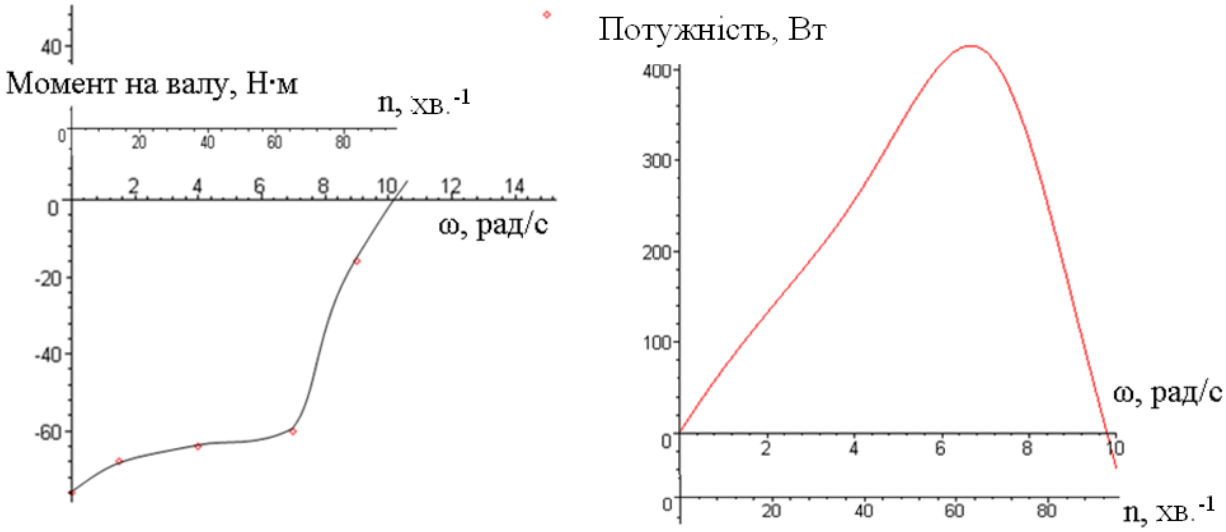


Рис. 1. Результати розрахунку крутного моменту на вісі установки.

Подальші розрахунки проводилися для різних швидкостей рівномірного обертання барабану. Розрахунки велися в нестаціонарній постановці з отриманням анімації полів швидкостей і тисків у ВЕУ. Шляхом апроксимації отриманих середніх моментів було визначено потужності, які можливо зняти з одного барабану (характеристика установки) – рис. 2.

Отримане різке зниження моменту при певних обертах свідчить про нестійкість обертання в цій області і наявності ефекту затиснення. Якісно картина течії є досить складною з утворенням великомасштабних вихорів за конфузором з повітропроводом. Необхідно підкреслити, що робота конфузора у відкритому потоці принципово відрізняється від аналогічних звужень каналів для внутрішньої задачі (наприклад, в трубах Вентурі) – у середовища є можливість обійти гідродинамічну перешкоду, якою є ВЕУ. Були проведені додаткові серії чисельних розрахунків, які показують деяке збільшення швидкості потоку в просвіті ВЕУ для даної 3D задачі (у зв'язку з симетрією моделювалася ¼ частини установки), при цьому для виявлення принципової можливості підвищення швидкості потоку розрахунки проводилися без врахування лопаток. Для діапазону швидкостей набігаючого потоку від 5 до 12 м/с швидкість в просвіті збільшувалася приблизно в 1,8 рази, що відповідає даним [1], де очікуване підвищення швидкості складає 1,5 ... 1,8 разів. Однак подальшим моделюванням (з вітроколесом і лопатками в окремому обертовому домені) встановлено значний вплив лопаток і миттєвого кута повороту турбіни, як місцевого опору складної форми, на розподіл

полів швидкостей і тиску в зоні конфузору. Розрахунок повної 3D моделі для змішаної задачі дозволив співставити результати з експериментальними даними вимірювання швидкості повітря чашковими анемометрами моделей МС-13 ГОСТ 6376-74 і API-49 ГОСТ7193-74 при роботі прототипу. Проведені експериментальні дослідження розподілу швидкостей підтвердили розрахункові дані по обтіканню ВЕУ.



а) **б)**

Рис. 2. Підсумкові графіки очікуваних моменту (*а*) і потужності (*б*) ВЕУ «КАСКАД-3» при мінімальній швидкості вітру на вході в конфузор 5 м/с

Висновки. На підставі проведених розрахункових досліджень були розроблені пропозиції щодо забезпечення максимальної потужності ВЕУ "Каскад-3" даної компоновки, серед яких: для зменшення аеродинамічного опору ВЕУ на вході в конфузор необхідно передбачити відкриті бічні зони на рівні осей турбін і можливість виходу повітря з застійних зон лопаток за тильною частиною розсікача; можливе зниження негативного впливу відриву вихорів за лопатками ВЕУ на розподіл тиску у внутрішній зоні конфузору за рахунок зменшення кількості лопаток спільно із збільшенням їх ширини (зменшення діаметру барабану турбіни) без втрат потужності ВЕУ "Каскад-3"; зміна (зменшення) кута розкриття конфузора для зсуву точки розшарування набігаючого потоку у внутрішню частину ВЕУ.

Література

1. Янсон Р.А. Вітроустановки : учеб. посібник / за ред. М.І. Осипова. – М. : Изд-во МГТУ ім. Баумана, 2007. – 36 с.

2. Рензо Д. Вітроенергетика / Д. Рензо, В.В. Зубарєв. – М. : Вища школа, 1982. – 271 с.

3. Приходько А.А. Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рухливих роторів вітроагрегатів Дар'є і Савоніуса / А.А. Приходько, Д.А. Редчиц // Аерогідродинаміка: проблеми і перспективи. – 2006. – Т. 2. – С. 120–142.

4. Шліхтінг Г. Теорія шару / Шліхтінг Г. – М. : Наука, 1974. – 712 с.

5. Ремізов П. П. Моделювання роботи турбіни гідродинамічного пристрою "Каскад-М" / П. П. Ремізов, С. А. Русанов, Д. А. Дмитрієв // Вост.-Європ. журн. передових технологій. – 2012. – № 2/8. – С. 64–67.

6. Пат. № 91 379 Україна, МПК F03B 13/10. Енергетичний Пристрій «КАСКАД-3» / Ремізов П.П. – Оголошене 09.10.2013 ; надрук. 10.07.2014 ; Бюл. № 13.

Рецензія/Peer review : 22.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф.Тіхосова Г.А.

УДК 621.313

С. М. БОЙКО, О.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, А.В. ПИРОЖЕНКО
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
С. Я. ВИШНЕВСЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет

ЛАБОРАТОРНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ПРИСТРОЇВ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

У статті підкреслено актуальність питання про посилення вивчення проблем використання поновлюваних джерел електричної енергії. Розглянута розроблена структура лабораторного стенду для дослідження роботи різних видів відновлюваних джерел живлення. Вказані основні вузли і технічні особливості лабораторного стенду. Досліджена робота транзисторних ключів, з метою відбору максимальної потужності при паралельній роботі декількох джерел енергії. Лабораторний стенд рекомендується для використання при підготовці спеціалістів електроенергетичних спеціальностей та для проведення наукових досліджень.

Ключові слова: електропостачання, електротехнологічні установки, альтернативні джерела енергії, вимірювальний блок

S.M. BOYKO, O.V. OMELCHENKO, A.V. PIROZENKO
Kremenchuk national university named after Michael Ostrogradskiy,
S.Y. VYSHNEVSKY
Vinnytsia national technical university

LABORATORY COMPLEX FOR THE RESEARCH ELEMENTS AND DEVICES OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF RECEIVER ELECTRICITY

Abstract – The article emphasized the urgency of strengthening the study of problems of renewable electricity. The designed structure of laboratory model was considered for the study of the various types of renewable power sources. The main components and technical features of laboratory stand were indicated. Work investigated transistor keys in order to select the maximum power in parallel operation of several energy sources. Laboratory model is recommended for the use in the preparation of specialties and specialists of electric power for scientific research.

Keywords: electricity, electrotechnological installation, alternative sources of energy, measurement unit

Вступ

Проблема автономного живлення електроприймачів з метою безперебійності їх роботи була і є актуальною для всіх без винятку підприємств. В останній час в зв'язку з розробкою нових відновлювальних джерел електричної енергії цей напрям зазнав впровадження нових цікавих варіантів.

Характерною особливістю таких джерел є те, що потоки енергії можуть бути використані лише частково та енергія від більшості надходить періодично, що не завжди співпадає з реальними графіками енергоспоживання споживачів. Тим не менше частка відновлювальних джерел енергії в енергетичному балансі країн світу постійно зростає [1].

Також інтерес для відповідних споживачів представляють різні типи електрохімічних та хімічних джерел електричної енергії.

Таким чином, альтернативні джерела енергії набувають все більшої привабливості щодо їх впровадження. Цей процес пов'язаний з розвитком та впровадженням різноманітних сучасних електротехнічних, електромеханічних, цифрових та інших систем і пристроїв призначених для використання та перетворення потоків енергії.

При цьому розуміння процесів, володіння методами їх реалізації, орієнтування у різноманітті технічних засобів, ставить перед викладачами задачу розробки відповідного лабораторного обладнання, яке повинно бути інструментом для підвищення ефективності опанування студентами теоретичних положень та набуття практичних навичок.[2]

Актуальність роботи. За сучасних умов підготовки фахівців напрямку електротехніка та електротехнології, при вивчені ряду учбових дисциплін, згідно навчальних планів, питання ефективного енерговикористання та перетворення енергії займає особливе місце. При цьому розуміння «фізики» процесів, володіння методами їх реалізації, орієнтування у різноманітті технічних засобів, ставить перед викладачами задачу розробки відповідного лабораторного обладнання, котре повинно бути інструментом для підвищення ефективності опанування студентами практичних навичок [3].

Мета роботи. Метою роботи є розробка структури та аналіз функціональних можливостей лабораторного комплексу для дослідження елементів та пристроїв автономного електрозабезпечення електроприймачів електричної енергії.

Матеріал і результати досліджень

Важливою умовою конструювання лабораторного обладнання, є відповідність таким критеріям:

- відповідати сучасним тенденціям техніки;

- бути універсальним, тобто охоплювати потрібно широкий спектр дисциплін, які викладаються на кафедрі;
- мати достатню технічну базу для проведення не лише лабораторних практикумів, а й проведення науково-дослідницьких експериментів;
- мати можливість доповнення та нарощування, при необхідності, новою елементною базою (модульність).

Представлений лабораторний комплекс дозволяє проводити наступні лабораторні роботи:

- дослідження енергетичних характеристик та перехідних процесів при роботі відновлювальних джерел електричної енергії на різне по характеру навантаження;
- дослідження впливу зовнішніх факторів на інтенсивність генерування електричної енергії відновлюваними джерелами живлення;
- дослідження роботи напівпровідникових перетворювачів та силового обладнання, яке входить до складу силової частини стенду;
- дослідження одночасної роботи двох, трьох відновлюваних джерел електричної енергії на спільне навантаження;
- дослідження роботи системи під час перехідних процесів, які виникають при комутації (підключення та відключення відновлювального джерела живлення (ВДЖ), підключення додаткових ВДЖ до вже працюючої системи);
- дослідження динамічних та статичних характеристик генераторів, що використовуються для генерування електричної енергії у ВДЖ;
- вивчення методів розрахунків основних енергетичних параметрів вище наведених ВДЖ.

В основу створення обладнання стенду поставлені наступні задачі:

- узгодження роботи генератора вітроенергетичної установки (ВЕУ) постійного струму, генератора ВЕУ змінного струму та сонячної батареї постійного струму на спільне навантаження при різних комбінаціях паралельної роботи;
- керування потоком енергії декількох ВДЖ;
- підвищення надійності системи електропостачання, що живиться від ВДЖ, шляхом використання мережі в якості резерву.

Комп'ютиризована система на базі ЕОМ, що застосовується на запропонованому лабораторному комплексі – розширює його можливості щодо дослідження перехідних процесів в різних режимах роботи відновлюваних джерел живлення, енергетичних характеристик відновлювальних джерел живлення [3 – 7].

Поставлені задачі вирішується введенням у структурну схему комплексу наступних елементів (рис. 1) [8]: блок вітрогенератора змінного струму (ВЗС); вітрогенератор постійного струму (ВПС); сонячна батарея постійного струму (СБ); блоки транзисторних ключів (ТК); зарядний пристрій (ЗП); понижувальний трансформатор (Тр); випрямляч (В); акумуляторна батарея (АКБ); інвертор (І); блок управління параметрами (БУП); блок широтно-імпульсного перетворення (ШІМ); блоки комутації (К), промислова мережа (М); блоки датчиків струму та напруги (ДН, ДС).

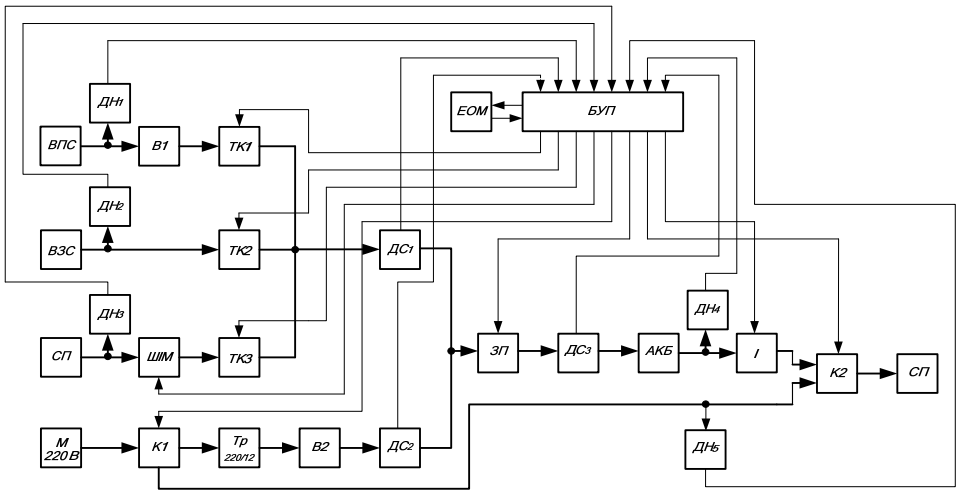


Рис. 1. Структурна схема комплексу

Запропонований лабораторний комплекс працює наступним чином. В нормальному режимі роботи джерела енергії ВПС, ВЗС, СП через тиристорні ключі ТК1, ТК2, ТК3 та датчик струму ДС1 передають енергію на зарядний пристрій ЗП, з якого енергія через датчик струму ДС3 передається до блоку акумуляторної батареї АКБ. Від блоку акумуляторної батареї АКБ постійний струм потрапляє на інвертор І, після якого змінний струм через комутатор К2 надходить до споживача СП.

У разі відмови джерел енергії ВПС, ВЗС, СП, споживач продовжує працювати від блоку акумуляторної батареї АКБ [9].

У разі відмови джерел енергії ВПС, ВЗС, СП та повної розрядки блоку акумуляторної батареї АКБ, блоком ЕОМ через блок БУП подається управляючий сигнал на комутатор К1, який змінює своє положення та підключає мережу М до блоку акумуляторної батареї АКБ через комутатор К1, трансформатор Тр, випрямляч В2, блок датчика струму ДС2, зарядний пристрій ЗП, блок датчика струму ДС3. Під час процесу зарядки блоку акумуляторної батареї АКБ споживач СП на пряму живиться від мережі М через комутатор К2, який спрацьовує при подачі блоком ЕОМ через блок БУП управляючого сигналу.

Після максимального заряджання блоку акумуляторної батареї АКБ зарядний пристрій ЗП відключає його від мережі М. Струм на датчиках струму ДС2, ДС3 зникає. В результаті чого на комутатор К1 надходить сигнал з блоку ЗП через блок управління параметрами БУП – мережа відключається і підключаються блок акумуляторних батарей.

Блоки транзисторних ключів ТК1, ТК2, ТК3 працюють від управляючих сигналів (рис.3), що надходять з ЕОМ через БУП на керовані входи напівпровідникових елементів. Принцип їхньої роботи побудований таким чином, що у разі роботи одного джерела живлення відповідний транзисторний ключ забезпечує передачу його енергії до споживача при наявності управляючого сигналу. За умови роботи двох чи трьох джерел живлення транзисторні ключі почергово, при наявності управляючих сигналів, відбирають генеровану енергію та передають її на зарядний пристрій утворюючи максимально безперервний потік енергії [9].

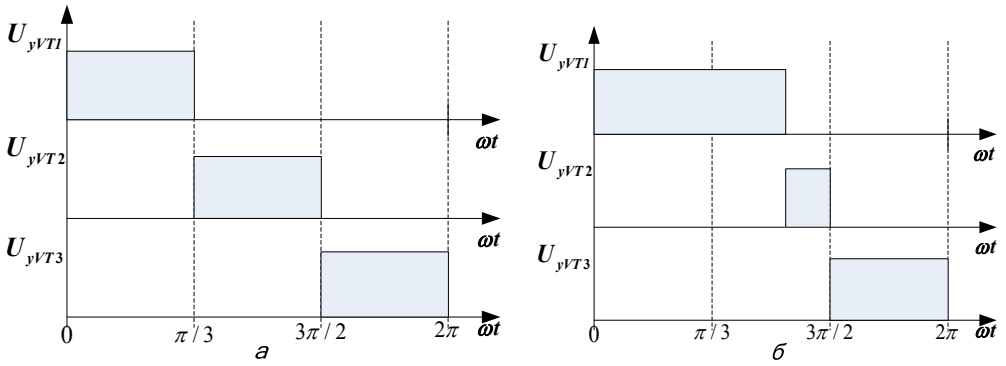


Рис. 2. Управляючі сигнали на керуючі входи транзисторів при: а) одночасній роботі та рівному рівні генерованої потужності трьох джерел живлення; б) одночасній роботі та різному рівні генерованої потужності

З метою дослідження автономних систем електропостачання на базі ВДЖ постійного струму при роботі на навантаження різного типу, запропоновано функціональну схему лабораторного комплексу.

Функціональна схема лабораторного комплексу представлена на рис. 3. До його складу входять наступні елементи: АК – акумуляторна батарея; І – інвертор; ПП – пусковий пристрій; БУ – блок узгодження сигналу з ЕОМ; С – ємнісне навантаження; R – активне навантаження; ЕМ – електрична машина; EL – освітлювальний пристрій; L – індуктивне навантаження; PA1-5, PV1-5 – аналогове вимірювальне обладнання; LA1-4, LA1-4 – датчики для контролю струму та напруги мережі стенда; QF1-7, SA1-7 – комутаційна апаратура.

Комп'ютеризована система на базі ЕОМ, що застосовується на запропонованому лабораторному комплексі – розширює його можливості щодо дослідження перехідних процесів в різних режимах роботи відновлюваних джерел живлення, енергетичних характеристик відновлювальних джерел живлення [10].

Лабораторний комплекс призначений для проведення досліджень процесів генерації електричної енергії альтернативними джерелами електричної енергії в різних режимах роботи та оцифровування результатів досліджень за допомогою вимірювальної системи, що видає інформацію в електронно-обчислювальну машину. Для контролю електричних параметрів в лабораторному стенді передбачено датчики струму та напруги, які, контролюючи відповідні параметри, передають інформацію до електронно-обчислювальної машини (ЕОМ) через блок погодження (БУ).

Живлення комплексу відбувається від лабораторної мережі однофазної напруги змінного струму. Силовий ланцюг стенда захищається автоматичним вимикачем QF1, за допомогою якого він підключається до мережі. Для контролю наявності струму та напруги мережі в лабораторному стенді передбачено амперметри (А) та вольтметри (V). При ввімкненні автомату FQ1 стенд підключається до мережі, в результаті чого запитується блок комутації. За показами вольтметра PV1 та амперметра PA1 спостерігаємо за рівнем напруги та струму мережі. Автоматом FQ2 підключається блок живлення контролера від акумуляторної батареї.

Після ввімкнення комп'ютера живлення блоку датчиків струму та напруги, відбувається зняття показів в електронному вигляді та відображення на моніторі комп'ютера з використанням програмного забезпечення. Датчики струму та напруги знімають покази паралельно аналоговим приладам.

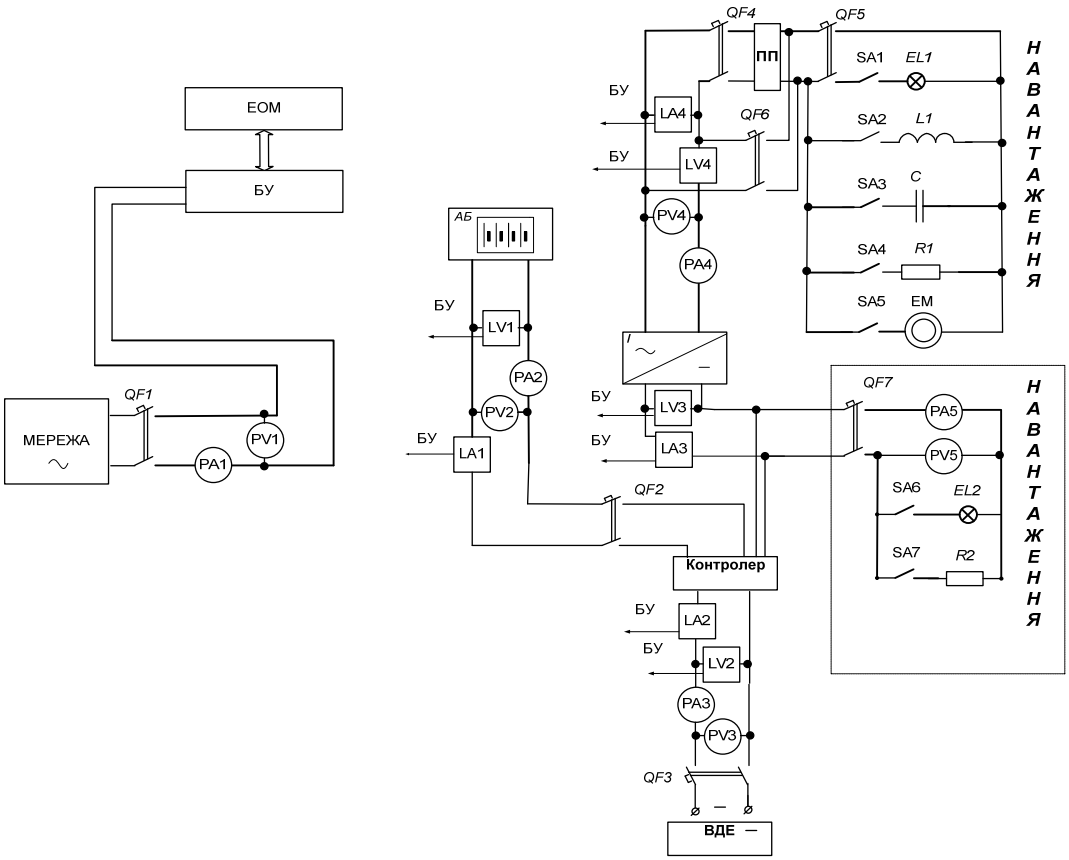


Рис. 3. Функціональна схема лабораторного комплексу

Автоматом FQ3 підключається блок відновлювального джерела електричної енергії до контролера. Автоматами FQ5, FQ7 підключається блок навантаження змінного струму через інвертор, чи постійного струму. Автоматами FQ4, FQ6 підключається блок навантаження змінного струму через блок пускового пристрою або без пускового пристрою. Тумблерами SA1-7 комутується навантаження [11].

Таким чином на лабораторному комплексі є можливість імітувати та досліджувати всі реальні робочі режими роботи автономних джерел електричної енергії на базі відновлювальних джерел енергії. Оскільки до складу лабораторного стенду входить типове обладнання, що використовується на реальних автономних джерелах електричної енергії, то є можливість, під час навчання студентів, максимально наблизити лабораторні роботи до реальних умов експлуатації, що підвищить якість навчання [12].

Виходячи із функціональних можливостей комплекса можна виділити наступні напрями досліджень:

- вивчення та дослідження технічних та енергетичних характеристик джерел постійного струму в системі автономного електропостачання;
- вивчення та дослідження технічних та енергетичних характеристик різних типів накопичувачів електричної енергії;
- вивчення та дослідження технічних та енергетичних характеристик систем контролю та управління процесами заряду/розряду акумуляторних батарей;
- вивчення автономних систем електропостачання обмеженої потужності для живлення різного типу навантаження.

Розроблений лабораторний комплекс дозволяє проводити наступні лабораторні роботи:

- дослідження енергетичних характеристик та перехідних процесів при роботі відновлювальних джерел електричної енергії на різне по характеру навантаження;
- дослідження впливу зовнішніх факторів на інтенсивність генерування електричної енергії відновлюваними джерелами живлення;
- дослідження роботи напівпровідникових перетворювачів та силового обладнання, яке входить до складу силової частини стенду;
- дослідження роботи системи під час перехідних процесів, які виникають при комутації;
- дослідження динамічних та статичних характеристик генераторів, що використовуються для генерування електричної енергії у ВДЖ.

В основу створення обладнання стенду поставлено наступні задачі:

- дослідження реальних статичних та динамічних режимів роботи ВДЖ;
- дослідження енергетичних характеристик ВДЖ у різних режимах роботи з різним типом навантаження, шляхом створення змінного навантаження;
- підвищення надійності системи електропостачання, що живиться від ВДЖ, шляхом

використання акумуляторних батарей в якості накопичувачів електричної енергії.

Висновки

1. Функціональна схема комплексу дозволяє дослідити процеси генерування електричної енергії альтернативних відновлюваних джерел живлення та дослідження паралельної роботи декількох ВДЖ на одне навантаження.

2. Застосування лабораторного комплексу із вказаною структурою дозволить проводити ряд лабораторних робіт та отримувати експериментальні дані перехідних процесів при дослідженні різних режимів роботи ВДЖ на спільне навантаження.

3. Розроблений лабораторний комплекс рекомендується для використання при підготовці спеціалістів електроенергетичних спеціальностей та для проведення наукових досліджень.

Літератури

1. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра /. Шефтер Я. И. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. Бойко С.М. Лабораторний комплекс для дослідження диференційного захисту силового трансформатора / Бойко С.М., Михайлинин Д.А., Вишневський С.Я. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. - №4. – С. 135-138.

3. Будзяк В. Становление ветроэнергетики в Украине // Энергетика Украины. — 1992. — № 3. — С. 13—17.

4. Ветроэнергетика / Под ред. Д. де Рензо. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 272 с.

5. Пат. 2403664 Російської федерації, МПК H 02 J 7/34. Пристрій багатоканальний агрегат безперебійного живлення споживачів напругою змінного та постійного струму / Хазімов Р. Р., Пжилуський А. А., Кисельов В. І., опубл. 10.11.2010р.

6. Пат. 200911076 України, МПК H 02 J 7/34. Пристрій локального електрозабезпечення від поновлювальних джерел енергії патент / Щур І. З., Турленко О. Р., Козій В. Б., опубл., 25.05.2009р., бюл. №10

7. Пат. 2262790 Російської федерації, МПК H 02 J 7/34. Пристрій автономної системи безперебійного електропостачання з відновлювальним джерелом живлення, патент / Медвєдєв Е. І., Сердобінцєв Ю. П., Рибніков А. В., опубл. 20.10.2005р., Бюл. № 29.

8. Калинов А.П., Гладырь А.И. Универсальное учебно-исследовательское оборудование для электромеханических лабораторий // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 1/2007 (1). – С. 14-19.

9. Денисюк С.П., Рибіна О.Б., Негодуйко В.О. Перші кроки до створення дієвих механізмів стимулювання розвитку альтернативної енергетики в Україні // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – № 30. – С. 5-14.

10. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.

11. Сінчук І.О. Навчально-науковий лабораторний стенд для дослідження роботи поновлюваних джерел живлення / Бойко С.М., Карлик Є.П., Сінчук І.О., Пархоменко Р.А., Удовенко О.А., Будніков В.М. // Електротехнічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу – Кременчук, КрНУ, 2012. – Вип.. 3/2012 (19) – С. 594-596

12. Бойко С.М. Лабораторний стенд для дослідження роботи різних видів відновлюваних джерел живлення на спільне навантаження / Бойко С.М., Карлик Є.П. // XXXVI научно-техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства. «Городской електротранспорт, электроснабжение и освещение городов». Программа и тезисы докладов. Часть 2. – Харьков, 2012. – С. 59-60

Рецензія/Peer review : 15.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф., Сінчук Олег Миколайович

УДК 621:389; 621.3.01

А.И. КУЗЬМИЧЁВ, Л.Ю. ЦЫБУЛЬСКИЙ
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ ИОНИЗАТОР ПАРОВ МЕТАЛЛОВ

Предложено новое устройство для получения ионизованного потока пара металлов на основе тигельного испарителя с индукционным нагревом, снабжённого термоэмиссионной вставкой для генерации ионизирующих электронов. Численное моделирование теплофизических процессов нагрева тигля и термоэлектронного ионизатора, а также расчёт и анализ траекторий термоэлектронов, использовались при конструировании устройства ионизации. Экспериментальная апробация ионизатора была проведена с использованием в качестве материала термоэмиссионной вставки псевдосплава, содержащего LaB_6, полученный методом порошковой металлургии. Применение термоэмиссионного ионизатора обеспечило увеличение степени ионизации парового потока меди более, чем в 10 раз. Данный термоэмиссионный ионизатор предназначен для применения в термоионной технологии нанесения покрытий металлами с бомбардировкой собственными ионами.

Ключевые слова: ионизация пара металлов, термоэмиссия, псевдосплав, LaB_6, индукционный нагрев, термоионное осаждение.

A.I. KUZMICHEV, L.YU. TSYBULSKY
National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

TERMOEMISSION IONIZER OF METAL VAPOR

Abstract – A new device for obtaining ionized metal vapor flow on the base of crucible evaporator with induction heating and additional thermoemission insertion as a source of ionizing electrons is proposed.

Numerical simulation of thermophysical processes of heating the crucible and the thermoemission ionizer as well as calculation and analysis of thermoelectron trajectories were used for designing the ionizing device. The original construction of the top crucible part, controlling the thermoelectron trajectories, is proposed. Experimental approbation of the thermoemission ionizer has been carried out with the induction evaporator of copper. A powder pseudoalloy, containing LaB_6, was used as a thermoemission material in the ionizer.

Employing the thermoemission ionizer ensures increase of ionization degree of copper vapor flow by more than 10 times. The given thermoemission ionizer may be used in the thermoion technology for metal coating deposition with self-ion bombardment.

Keywords: metal vapor ionization, thermoemission, pseudoalloy, LaB_6, induction heating, thermoion deposition.

Введение

Постановка проблемы в общем виде. В технологии обработки поверхности важную роль играют процессы, использующие ионную бомбардировку, в частности, процессы ионно-плазменного азотирования и термоионного осаждения покрытий [1, 2]. Для получения покрытий высокого качества применяют бомбардировку собственными ионами [2], а для получения потока пара осаждаемых металлов – тигельные испарители, в том числе с индукционным нагревом [3–5]. Данный вид нагрева может применяться в широком диапазоне давлений рабочего газа и позволяет получать не только покрытия из сплошного металла, но также микро- и нанодисперсное вещество методом объёмной конденсации в газовой среде [5]. Важной проблемой при разработке термоионного устройства является выбор типа и конструкции ионизатора пара. Решению этой проблеме посвящена данная работа.

Анализ публикаций. Были предложены различные методы ионизации пара из индукционного испарителя – за счёт электромагнитного поля самого индуктора-нагревателя тигля [4,6] или дополнительного индуктора, размещаемого над тиглем [6], а также посредством полокатодного разряда, создаваемого внутри цилиндрического тигля в паровой среде, при котором ионизация пара осуществляется вторичными электронами, эмитируемыми верхней частью стенки тигля под действием бомбардировки ионами пара [4,7,8].

Наиболее простое устройство реализуется в случае, когда функцию ионизатора выполняет индуктор-нагреватель тигля, но это не самое оптимальное решение, т.к. для ионизации предпочтительны частоты мегагерцевого диапазона, а для нагрева – килогерцевого. Компромиссом являются частоты порядка 0,5-1,0 МГц с повышенным напряжением на индукторе (до и более 1 кВ), но это увеличивает вероятность электрических пробоев между витками в реальных условиях технологического процесса. Применение двух индукторов с двумя генераторами ВЧ питания усложняет конструкцию термоионного устройства, а использование вторичной ионно-электронной эмиссии полокатодного разряда внутри тигля может привести к загрязнению покрытия распылённым материалом тигля.

Цель работы – разработать и исследовать термоэмиссионный ионизатор паров металла, в котором для ускорения электронов использовать потенциальное поле верхнего витка индуктора-нагревателя тигля. Выбор ионизатора с подогревом оправдан тем, что рабочая температура тигля должка быть порядка 1500°С, при которой могут функционировать многие термоэмиссионные материалы, поэтому ионизатор может нагреваться вместе с тиглем. Для обоснования выбора конструктивных элементов ионизатора будет применяться численное моделирование теплофизических процессов нагрева тигля и ионизатора, а также расчёт и анализ траекторий термоэлектронов. Будет осуществлён выбор термоэмиссионного материала и проведена экспериментальная апробация нового ионизатора.

Выбор конструкции термоэмиссионного ионизатора

Анализ возможных конструктивных вариантов реализации термоэмиссионного ионизатора в испарителе с индукционным нагревом привёл к конструкции, показанной на рис. 1 [9].

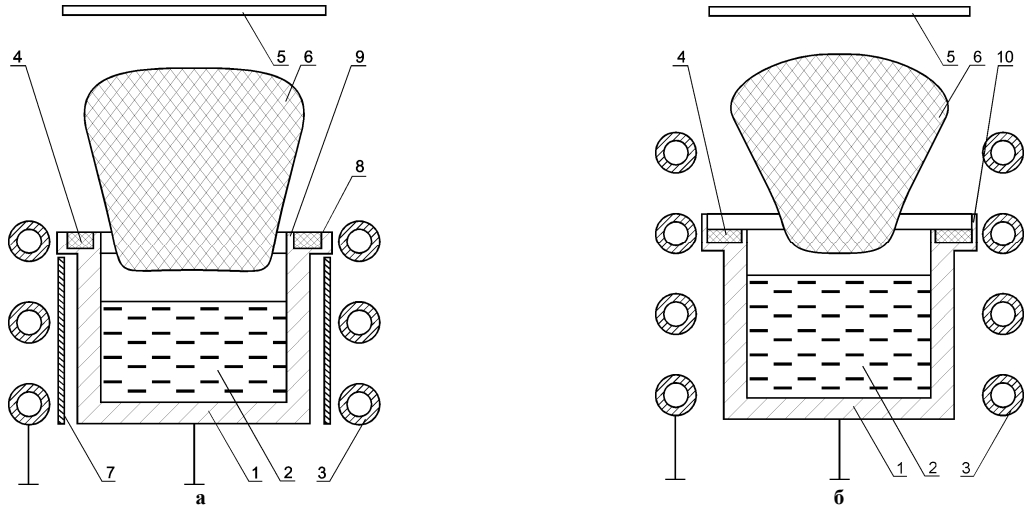


Рис. 1. Термоионное индукционное устройство с термоэмиссионной вставкой в тигле: 1 – тигель, 2 – загрузка, 3 – индуктор, 4 – термоэмиссионная вставка, 5 – подложка/коллектор ионов, 6 – паровой поток, 7 – тепловой экран, 8 – утолщение тигля, 9 – внутренняя кромка тигля, 10 – выступ на внешней кромке утолщения тигля (электрический экран)

Данная конструкция содержит тигель 1 с загрузкой 2 (расплавом испаряемого металла или гранулами сублимирующего материала) внутри индуктора-нагревателя 3. Тигель снабжён вставкой 4, выполненной в виде кольца из термоэмиссионного материала и расположенной на верхнем торце тигля. Индуктор-нагреватель подключён к генератору переменного напряжения (рабочая частота – 66-440 кГц). Конструкция индуктора является определяющим фактором, влияющим на все параметры и характеристики индукционного испарителя. В нашем случае применяем четырёхвитковый индуктор (рис. 1б). Верхний виток индуктора выступает над верхним краем тигля. В положительный полупериод напряжения на индукторе его верхний виток выполняет роль анода. Нижний виток и тигель заземлёны. Над тиглем расположена электропроводящая подложка (коллектор ионов) 5, на которую направляется поток ионизированного пара 6. На подложку подаётся потенциал отрицательного смещения, который ускоряет ионы, бомбардирующие подложку. Как будет показано ниже, отрицательный потенциал подложки отражает термоэлектроны и создаёт условия для их осцилляций в паровой среде между тиглем и подложкой, что существенно удлиняет траектории термоэлектронов и повышает вероятность ионизации ими пара. Между тиглем и индуктором может размещаться цилиндрический тепловой экран 7 из диэлектрика или тонкого металла с продольным разрезом (рис. 1а).

Верхний торец тигля имеет радиальное утолщение 8 с канавкой между внутренней кромкой тигля 9 и внешней кромкой 10; в канавке размещается кольцевая термоэмиссионная вставка 4 (рис. 1а). Расположение вставки в канавке защищает её от прямого потока пара. Торцевое утолщение 8 выполнено с радиальным выступом в сторону индуктора для увеличения электромагнитной связи с индуктором, что способствует более эффективному нагреву термоэмиссионной вставки. Повышенная температура вставки необходима не только для большей термоэмиссии, но и для мгновенного испарения с её поверхности сконденсировавшегося пара испаряемого из тигля вещества.

Конструкция, представленная на рис. 1б, отличается от конструкции на рис. 1а наличием выступающего вверх экрана (выступающей вверх внешней кромки тигля 10), который препятствует прямому пролёту термоэлектронов к близкорасположенному витку индуктора. По идее, благодаря этому экрану должна удлиняться траектория термоэлектронов и повышаться вероятность ионизации ими молекул пара. Материалы тигля и вставки должны быть инертными по отношению к испаряемому материалу. Например, при испарении меди или золота в качестве материала тигля могут быть использованы молибден или графит. Выбор материала термоэмиссионной вставки будет обсуждаться ниже.

Моделирование термоэмиссионного ионизатора

Данный раздел посвящён численному моделированию ионизатора и расчёту траекторий термоэлектронов, анализ которых позволил обоснованно выбрать конфигурацию термоэмиссионной вставки 4 и размеры выступающего экрана 10 (рис. 1б) и расположения верхних витков индуктора.

Произведено комплексное моделирование испарителя с привязкой к размерам и режимами работы. Вначале решались две комплексные задачи: прямая задача определения распределения напряжённости магнитного поля в окрестности испарителя и токов в тигле с загрузкой и индукторе; обратная задача определения токов в тигле с загрузкой по заданной температуре испаряющей поверхности. Затем по

известному амплитудному значению потенциалов индуктора, коллектора и тигля определялось распределение электрического поля в окрестности испарителя и траектории эмитированных электронов.

Определение электромагнитного поля в окрестности испарителя и поля токов в тигле с загрузкой основано на численном расчёте методом конечных разностей уравнений Максвелла для самосогласованного электромагнитного поля, возбуждаемого токами индуктора и тигля [10]. С учётом осевой симметрии конструкции устройства моделирование проводится в цилиндрических координатах. При расчёте параметры и характеристики материалов элементов устройства принимаются ортотропными с постоянной магнитной проницаемостью. Магнитные свойства материалов считаем линейными, т.е. величины, описывающие поле в любой его точке, изменяются во времени синусоидально.

Ток в индукторе рассматривается как сумма стороннего тока, возбуждённого внешней электрической цепью, и вихревого тока, индуцированного переменным магнитным полем

$$j = j_{\text{стор}} + j_{\text{вихр}} \cdot$$

Описание электромагнитного поля представляется дифференциальным уравнением в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала **A** (**B** = **rot A**, **B -** вектор магнитной индукции). Вектор магнитной индукции **B** предполагается лежащим в плоскости модели ($z0r$), а вектор плотности электрического тока **j** и векторный магнитный потенциал **A** ортогональны к нему. Только компоненты j_θ и A_θ отличны от нуля (обозначаем просто j и A). Тогда окончательно выражение для численных расчётов осесимметричной модели:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r\mu_z}\frac{\partial(rA)}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu_r}\frac{\partial A}{\partial z}\right)-i\omega\cdot\gamma\cdot A=-j_{\text{стор}},$$

где электропроводность γ и компоненты тензора магнитной проницаемости μ_z и μ_r постоянны в переделах каждого элемента модели. Составляющая тока $j_{\text{стор}}$ принимается обратно пропорциональной радиусу.

Плотность тока смещения не оказывает заметного влияния до мегагерцевых частот изменения поля. Член $\partial\mathbf{D}/\partial t$ в формуле закона Ампера не учитываем, т.е. плотностью тока смещения пренебрегаем. Тогда имеем: $rot\,\mathrm{H} = \mathrm{j}$.

В однородных изотропных средах, какими являются металлы, электропроводность не зависит от направления и напряжённости электрического поля E и связана с ним законом Ома. Поэтому можно задать не компоненты тензоров, а интегральные значения магнитной проницаемости и электропроводности элементов.

Отсутствия нормальной составляющей индукции на оси симметрии и на удалённых границах области задаётся через условие Дирихле, которое задает известное значение векторного магнитного потенциала $\mathbf{A}_0$ [10]. На оси симметрии модели термоионного устройства задано однородное граничное условие Дирихле, т.е. значение нормальной составляющей индукции равно нулю ($B_r = 0$).

Поскольку все свойства веществ зависят от температуры, в расчётах учитывались экспериментальные значения параметров и свойств тигля и загрузки при температуре испарения загрузки, при которой давление насыщенных паров над поверхностью испарения составляет p = 1,33 Па = 10^{-2} Торр.

При расчётах определяются следующие величины:

1. Величина и распределение токов в тигле и навеске для определения тепловыделений и расчёта температурного поля;
2. Распределение напряжённости магнитного и электрического поля в пространстве испарителя для определения траекторий эмитированных электронов;
3. Амплитудное значение напряжения на верхнем витке индуктора при достижении заданной температуры испарения.
4. Омические потери, которые используются как источники тепла при определении температурного поля в загрузке (комбинированная термоэлектрическая задача);
5. Структура электрического поля в окрестности термоэмиссионного устройства.
6. Траектории электронов, эмитированных вставкой из термоэмиссионного материала.

Температурное поле определялось решением уравнения теплопроводности [11] с источниками тепла от джоулевых потерь при протекании тока в тигле и загрузке. Также учитывались потери на излучение и испарение.

Для определения структуры электрического поля численно решалась система **у**равнений для электрического потенциала, включающая уравнение Пуассона **(** $\nabla\cdot\varepsilon\vec{\mathrm{E}}=\rho$ **)** и уравнение растекания токов в проводящей среде **(** $\nabla\cdot\vec{j}=-i\omega\rho$ **)** при учете закона Ома**.**

Для осесимметричного двумерного случая

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\varepsilon_r r\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_z\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)=-\rho,$$

При решении задачи учитывались граничные условия в виде потенциалов токопроводящих поверхностей (условия Дирихле). Структура поля не изменяется при изменении фазы или частоты тока

индуктора, и определяется исключительно конструкцией. Азимутальная составляющая поля отсутствует.

Используя рассчитанное электрическое поле, определялись траектории электронов со следующими ограничениями:

- релятивистские эффекты ввиду малых ускоряющих напряжений не учитываются;
- электрическое поле считается стационарным за время пролёта электронов через промежутки в системе тигель-подложка/коллектор (т.е. имеет место квазистационарный режим);
- внутри конечного элемента электростатическое поле изменяется линейно;
- движения электронов рассматривается в электростатическом поле, не учитывается влияние пространственного заряда (аппроксимация малым током), т.е. прослеживалась траектория одиночных электронов;
- все термоэлектроны в пучке имеют одинаковую кинетическую энергию.

Для нахождения траектории электрона в рассчитанном неоднородном электрическом поле задаётся начальная кинетическая энергия (скорость) и направление вылета с поверхности эмиттера. В соответствии со сделанными допущениями траектория *(*x*(t)*, y*(t)*, z*(t))* заряженной частицы в двумерном электростатическом поле ***E****(*x,y*)* описывается системой дифференциальных уравнений Ньютона:

$$\begin{cases} \dfrac{d^2x}{dt^2} = \dfrac{e}{m}E_x(x,y); \\ \dfrac{d^2y}{dt^2} = \dfrac{e}{m}E_y(x,y); \\ \dfrac{d^2y}{dt^2} = 0, \end{cases}$$

где e – заряд и m – масса электрона, соответственно.

Уравнение, определяющее длину l*(t)* траектории в момент времени t:

$$\frac{dl}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}\ .$$

Интегрирование этой системы уравнений производилось численным методом Мерсона-Рунге-Кутта: автоматический выбор шага, численное интегрирование прекращается непосредственно перед границей конечного элемента; в последней точке внутри элемента производится экстраполяция траектории с помощью первых трех членов разложения Тейлора относительно времени. Полученное уравнение решается с помощью формулы Тартагилья-Кордано и учитывает уменьшение порядка уравнения в однородных или нулевых полях.

При расчётах угол вылета отсчитывается между направлением вектора скорости и направлением оси симметрии модели.

На рис. 2 − рис. 4 представлены примеры расчётов параметров и характеристик термоэмиссионного ионизатора паров металлов для молибденового тигля и медной загрузки (температура испарения 1545 К) и частоте напряжения генератора 440 кГц. Выбранная частота является разрешённой для промышленности. Размеры тигля и ионизатора приведены ниже в экспериментальном разделе статьи.

На рис. 2 показано силовые линии магнитного поля в окрестности испарителя в осевом сечении тигля. Там же показана тоновая карта напряжённости магнитного поля и токи в Мо тигле. Видно, что ток не проникает в загрузку. Более точные расчёты показывают, что ток в загрузке индуцируется, но его амплитуда на границе с тиглем в сотни раз меньше, чем на поверхности тигля.

Данные по распределению тока, как источника тепла, позволили рассчитать температурное поле в тигле с загрузкой, показанное на рис. 3б. Расчёт произведен итерационно до совпадения температуры на поверхности загрузки с заданной в 1545 К. После чего определялось амплитудное напряжение на индукторе.

На рис. 3а приведен график распределения температуры на поверхности загрузки и в тигле вдоль радиуса (см. рис. 3б), при амплитудном значении напряжения на индукторе 90 В. Из графика и изотерм рис. 3 видно, что край тигля и вставка LaB_6 имеют более высокую температуру, чем загрузка. Этот факт способствует повышенной эмиссии с поверхности вставки.

Были также выполнены расчёты электрического поля в термоэмиссионном ионизаторе и траектории термоэлектронов для тиглей с различной высотой выступа-экрана 10 (см. рис. 1б). На рис. 4 показана структура поля и траектория электронов для тиглей с выступом высотой 10 мм (рис. 4а, 4б) и 5 мм (рис. 4в, 4г). Каждый расчёт осуществлялся для 12 электронов с начальной энергией 0,1 эВ и углами вылета с поверхности от -90º до 90º. Эквипотенциали построены для положительного амплитудного значения напряжения на верхнем витке индуктора. Задаваемые потенциалы: верхнего витка индуктора +90 В (между витками 30 В), нижнего витка индуктора и тигля – нулевые (они заземлены), коллектор ионов −10 В. Расстояние между эквипотенциалями 3 В на рис. 4а, 4б и 4 В на рис. 4в, 4г.

Рассчитанные траектории электронов показывают, что высота выступа-экрана на тигле существенно влияет на фокусировку электронов в области парового потока. Все термоэлектроны при высоте выступа 10 мм направляются в середину парового потока (см. рис. 4а, 4б), а отражение термоэлектронов электрическим

полем подложки/коллектора приводит к осцилляции электронов в паровой среде между тиглем и подложкой и повышению эффективности ионизации пара. При выступе высотой 5 мм термоэлектроны направляются в периферийную область парового потока и уходят на витки индуктора. На основании анализа траекторий термоэлектронов делаем вывод о целесообразности выбора высоты выступа 10 мм.

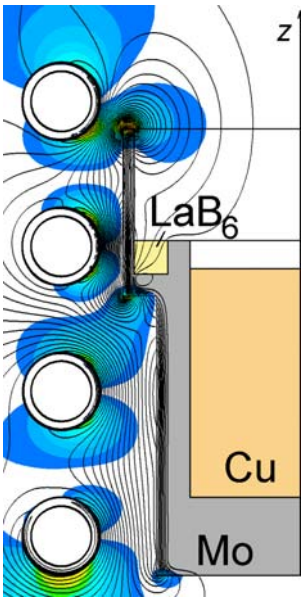


Рис. 2. Силовые линии и тоновая карта напряжённости магнитного поля в окрестности испарителя, и токи в тигле

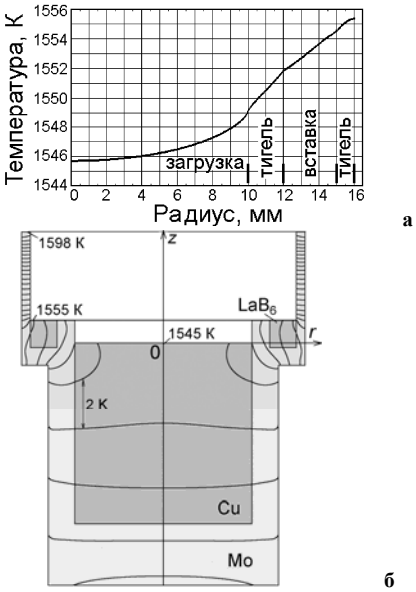


Рис. 3. Распределение температуры в тигле с загрузкой при амплитуде напряжения на индукторе 90 В: а − на поверхности, б − в объёме

В отрицательный полупериод напряжения на индукторе эмиссия термоэлектронов подавлена, поэтому процесс ионизации пара носит импульсный характер.

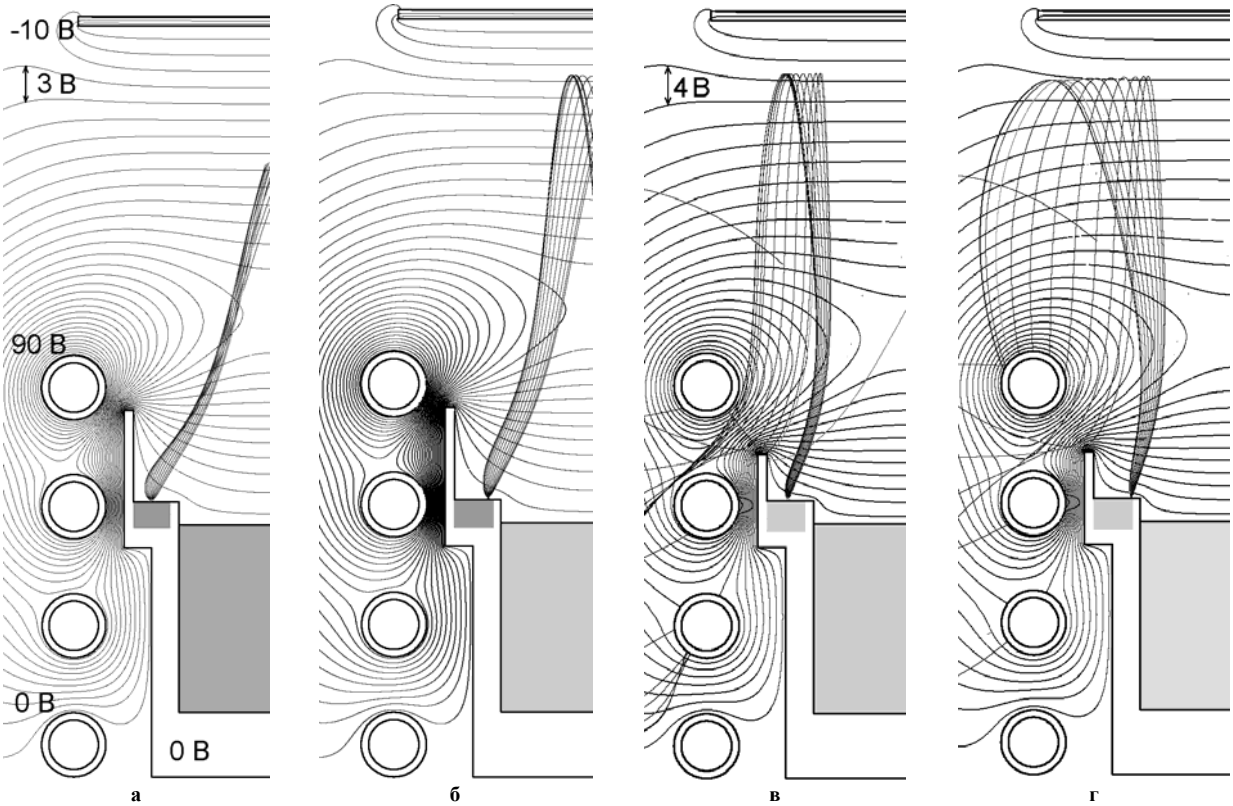


Рис. 4. Линии напряжённости электрического поля в окрестности испарителя и траектории эмитированных электронов для тигля с выступом разной длины: а, б − 10 мм; в, г − 5 мм (потенциалы электродов для всех случаев одинаковые)

При расчёте не учитывалось влияние переменного магнитного поля и вихревого электрического поля из-за их малой величины и экранирующего действия выступа на тигле.

Выбор материала термоэмиссионного ионизатора

Исходя из высокой рабочей температуры тигля (~ 1500−1700°C), следует выбирать высокотемпературный термоэмиссионный материал. Анализ данных подобных материалов [12] позволяет сделать вывод о перспективности гексаборида лантана (LaB_6), который уже давно применяется в различных электронных и ионных приборах и отличается высокими термоэмиссионными свойствами, стойкостью к бомбардировке электронами и атомными частицами, относительно химически инертен, допускает неоднократное (до сотен раз) попадание в открытую атмосферу с последующим восстановлением эмиссионных свойств [13–17]. В табл. 1 приведены данные по работе выхода LaB_6 и тугоплавких металлов, применяемых в термоэмиссионной и испарительной аппаратуре.

Таблица 1

Работа выхода термоэмиссионных материалов [16]

Материал	LaB_6	Mo	Ta	W
Работа выхода, эВ	2,67-2,91	4,2	4,1	4,55

На рис. 5 приведены для LaB_6 и W зависимости плотности тока эмиссии от температуры и скорости испарения от плотности тока. Как видно по данным табл. 1 и рис. 5, LaB_6 в наибольшей степени подходит для применения в качестве термоэмиссионного материала в испарителях химически неактивных металлов, покрытия из которых применяются в электронике, электротехнике и приборостроении (Cu, Au).

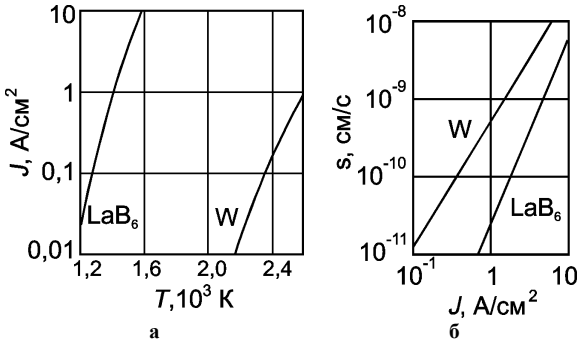


Рис. 5. Плотность тока эмиссии с LaB_6 и W при нулевом поле (а) и скорость их испарения в зависимости от плотности тока (б) [14]

В электронных и ионных приборах, как правило, применяют компактированный LaB_6, полученный путём горячего прессования исходного порошка [13−16], но неплохие результаты получены с термоэмиттерами из LaB_6, полученными методом плазменного напыления [17]. В Киевском политехническом институте были испытаны в качестве катодных материалов псевдосплавы, разработанные в институте проблем материаловедения НАНУ, которые показали хорошие эмиссионные свойства и стойкость к действию разного рода факторов электрических разрядов [18,19]. Эти псевдосплавы представляют собой композицию из спечённых микропорошков тугоплавких металлов (Mo, W), металла-связки (Ni) и LaB_6. По сути, эти сплавы представляют собой металлическую губку с эмиссионно-активной фазой в середине. Внешние слои губки защищают эмитирующее вещество (La) от окисления при попадании материала в открытую атмосферу. Такой материал был выбран для апробации в настоящей работе.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Для исследования влияния термоэмиссионной вставки на ионизацию парового потока в индукционном испарителе было изготовлено и апробировано устройство, представленное на рис. 1б. Испаритель содержит тигель, выточенный из молибдена марки МЧВП, внутренний диаметр тигля – 20 мм. В канавку на его торце свободно помещается кольцо, изготовленное методом порошковой металлургии из LaB_6 с добавкой Mo (зерно порошка 30-50 мкм). Размер вставки: сечение 3×3 мм, внутренний радиус 24 мм[3]. Площадь эмитирующей поверхности составляет около 2,5 см^2. Расстояние от выступающего экрана 10 до ближайшего витка индуктора около 4 мм. Высота выступа экрана над термоэмиссионной вставкой – 10 мм. Над тиглем размещается подложка/коллектор ионов диаметром 60 мм, на которую подавалось напряжение отрицательного смещения $U_{см} = –(10…200)$ В.

Для испарения использовали медь марки МВ. Давление остаточных газов в технологической камере вакуумной установки обеспечивалась ниже 10^{-4} Па. Частота питания индуктора – 440 кГц.

Температура тигля измерялась термопарой, прикреплённой к дну тигля. При нагреве тигля без загрузки до температуры около 1500°C ток термоэлектронной эмиссии на подложку-коллектор составил 1,2 А. Это соответствовало плотности тока термоэлектронов со вставки 0,48 А/см^2. Данная величина меньше значений для термокатода из LaB_6, приведенных в [13, 14]. Это объясняется меньшей эмитирующей поверхностью зерён LaB_6 в смеси с Mo для вставки, примененной в нашем эксперименте. В [13,14] применялся чистый гексаборид, работающий в среде водорода или аргона. Тем не менее, полученная термоэмиссия вполне достаточна для ионизации пара в процессе термоионного осаждения. В этом

испарителе при тех же условиях эксперимента и загрузке тигля медью над тиглем возникал и поддерживался интенсивный разряд дугового (газотронного) типа, в котором величина постоянного тока ионов меди на коллектор составляла около 600 мА ($U_{см}$ = –20 В). В случае удаления термоэмиссионной вставки в том же режиме испарения ионный ток на коллектор составлял около 45 мА (этот ток был идентифицирован как ток обратного зажигания). Таким образом, термоэлектроны вносят существенный вклад в поддержание электрического разряда в паровой среде.

Возможность длительной работоспособности устройства была подтверждена при успешном испарении со стабильной ионизацией пара 20-и загрузок тигля с напуском атмосферного воздуха в технологическую камеру для очередной загрузки. На поверхности вставки после выполнения очередного испарения не было заметно следов меди (она полностью испарялась) или окисления. После 14-го цикла "загрузка/испарение" в кольце термоэмиссионной вставки появилась трещина, но это не сказалось на работоспособности устройства, т.к. эмитирующая поверхность вставки не изменилась. Поскольку вставка удерживается благодаря свободному размещению в канавке на верхнем торце тигля, вставку можно изготавливать не в виде сплошного кольца, а в виде отдельных фрагментов. Это существенно удешевляет её изготовление и упрощает её замену.

Таким образом, введение в конструкцию тигля термоэмиссионной вставки является оправданным приёмом для усовершенствования термоионного устройства с индукционным нагревом.

Выводы

Предложена конструкция термоэмиссионного ионизатора паров металлов для работы в составе индукционного испарителя. Для нагрева ионизатора применяется электромагнитное поле индуктора, нагревающего тигель.

Выполнено физико-топологическое математическое моделирование термоэмиссионного ионизатора. Модель позволила определить распределение температурного поля в зависимости от напряжения на индукторе, выбрать величину рабочего напряжения, рассчитать структуру электрического поля и траектории термоэлектронов. Анализ траекторий был использован для выбора размеров конструктивных элементов ионизатора.

Проведена экспериментальная апробация термоэмиссионного ионизатора, подтвердившая его работоспособность, многократное повышение ионного тока на подложку/коллектор ионов (более чем в 10 раз) и целесообразность применения в составе индукционного испарителя металлов. Ионизатор может быть рекомендован для применения в термоионной технологии осаждения покрытий металлами с бомбардировкой собственными ионами.

Литература

1. Пастух І.М. Попередні передумови для застосування азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами / І.М. Пастух, Г.М. Соколова, В.С. Курской // Вісник ХНУ. – 2013. – № 3. – С. 199–202.

2. Белевский В.П. Методы термоионного осаждения для нанесения металлических покрытий / В.П. Белевский, А.И. Кузьмичев. – К. : Об-во "Знание" Украины, 1984. – 22 с.

3. Саенко В.А. Источники плазмы и ионов с однородно испаряющимся электродом / В.А. Саенко // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1997. – № 3. – С. 35–60.

4. Кузьмичев А.И. Термоионное устройство с индукционным испарителем / А.И. Кузьмичев, Л.Ю. Цыбульский // ПТЭ. – 1992. – № 2. – С. 262–264.

5. Кузьмичёв А.И. Получение и обработка микро- и нанодисперсных материалов с помощью индукционного нагрева / А.И. Кузьмичёв, Л.Ю. Цыбульский // Сб. докл. 18-го Междунар. симп. "Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике" в рамках Харьковской Нанотехнологической Ассамблеи (Харьков). – 2006. – Т. 2. – С. 50–59.

6. Kuzmichev A., Tsybul'skii L. Evaporators with Induction Heating and Their Applications. Chapter 13 (P. 269–302) in book «Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials». Ed. S. Grundas. – Publisher: InTech, 2011. – 752 p.

7. Цыбульский Л.Ю. Исследование полокатодного эффекта в термоионном устройстве с индукционным нагревом / Л.Ю. Цыбульский // Электроника и связь. – 1998. – Вып. 4. – Ч. III. – С. 495–499.

8. Кузьмичёв А.И. Условия возникновения полокатодного разряда в тигельном термоионном устройстве с индукционным нагревом / А.И. Кузьмичёв, Л.Ю. Цыбульский, А.А. Светлов // Электроника и связь. – 2000. – № 8. Т. 1. – С. 96–99.

9. Пат. 13134u Україна, МПК C23C 14/32, C23C 14/26, C23C 14/40. Джерело іонізованого парового потоку / Кузьмичєв А.І., Цибульский Л.Ю. ; заявник і патентовласник Національний технічний університет України "КПІ". – № u200509124 ; заявл. 27.09.05 : опубл. 15.03.06, Бюл. № 3 (Кн. 1).

10. Немков В.С. Теория и расчёт устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л. : Энергоиздат, 1988. – 280 с.

11. Исаченко В.П. Теплопередача : учебник для вузов. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 3-е изд. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.

12. Куницкий Ю.А. Высоко-температурные электродные материалы / Ю.А. Куницкий, Морозов В.В., Шлюко В.Я. ; под общ ред. Г.В. Самсонова. – К. : Вища школа, 1977. – 232 с.

13. Goebel D.M. Lanthanum hexaboride hollow cathode for dense plasma production / D.M. Goebel, J.T. Crow, A.T. Forrester // Rev. Sci. Instrum. – 1978. – V.49. – No.4. – P. 469–472.

14. Форрестер А.Т. Интенсивные ионные пучки / А.Т. Форрестер. – М. : Мир, 1991. – 358 с.

15. Choi Y.-W. Development of a 30-kW Plasma Gun System With a Long Lifetime / Y.-W. Choi, Ch. Cho, Y.-S. Choi, K.-I. Lee, and J. Kim // IEEE Trans. on Plasma Science. – 2008. – V. 36. – No. 5. – P. 2765–2769.

16. Chu E. High-Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode for 10-to-50-kW Hall Thrusters / E. Chu, D. M. Goebel // IEEE Trans. on Plasma Science. – 2012. – V. 40. – No. 9. – P. 2133–2144.

17. Алексеев Г.И. Исследование свойств термоэмиттеров из LaB_6, изготовленных методом плазменного напыления / Г.И. Алексеев, И.Я. Аристова, И.К. Батрак, А.М. Бишаев, В.В. Морозов // Электронная техника, Сер. Материалы. – 1985. – № 8 (207). – С. 7–12.

18. Кузьмичёв А.И. Исследование поведения катодных материалов, содержащих включения эмиссионно-активной фазы, в режиме сверхплотного тлеющего разряда / А.И. Кузьмичёв, В.И. Крижановский, Г.В. Левченко, Р.Б. Лубан, А.И. Шендаков // Порошковая металлургия. – 1981. – № 1 (225). – С. 73–75.

19. Кузьмичёв А.И. Влияние включений LaB_6 в материале катода на его эрозию и параметры импульсного дугового разряда / А.И. Кузьмичёв, В.И. Крижановский, Г.В. Левченко, Р.Б. Лубан, А.И. Шендаков // Теплофизика высоких температур. – 1989. – Т. 27. – № 6. – С. 1219–1221.

Рецензія/Peer review : 20.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н. Котовський В.Й.

УДК 621.317; 537.523

В.А. ПОРЄВ, К.М. БОЖКО, С.Ю. СИДОРЕНКО
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЗБУДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДЕФЕКТІВ

Досліджено умови та параметри збудження негативного імпульсного коронного розряду у повітрі. Запропоновано конструкцію газорозрядного пристрою на основі прозорого електроду для візуалізації дефектів у коронному розряді. Наведено результати контролю дефектів телевізійним засобом.

Ключові слова: імпульсний коронний розряд, газорозрядна візуалізація, телевізійна інформаційно-вимірювальна система.

V.A. POREV, K.M. BOZHKO, S.YU. SYDORENKO
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

EXCITED BY A PULSED CORONA DISCHARGE IN THE AIR FOR DEFECT VISUALIZATION

Studied the conditions and parameters of excitation negative pulse corona discharge in the air. The design of gas-discharge device for the visualization of defects in the corona. The results of monitoring defects television means.

Keywords: pulse corona discharge, gas discharge visualization, TV information and measuring system.

Вступ

Газорозрядна візуалізація побудована на ефекті збудження коронного розряду в просторі між двома електродами при подачі на них високої напруги. Теоретичний аналіз газового розряду взагалі і коронного розряду зокрема створює підгрунтя для розробки нових і вдосконалення вже існуючих засобів і методів контролю дефектів із застосуванням газорозрядної візуалізації. При цьому клас об'єктів контролю може бути також розширений відповідно до конструктивних особливостей газорозрядного пристрою, а також режиму збудження коронного розряду.

Фізичною моделлю, яка була однією з перших побудована на численних експериментах, є система електродів вістря-площина, в якій і розвивається газовий розряд. В цій системі один із електродів є загостреним і розташованим перпендикулярно до іншого електроду плоскої форми. На цій моделі базується сучасна теорія коронного розряду, а також створені реально діючі пристрої збудження корони.

Наше дослідження має на меті окреслити напрямки подальшого пошуку нових конструктивних і схемних рішень для газорозрядної візуалізації дефектів на основі імпульсного коронного розряду.

Представлена нами задача обмежена розглядом газового розряду, який збуджують в повітрі при атмосферному тиску. Газорозрядна візуалізація дефектів за такої умови має спрощену підготовку об'єктів до контролю та надає можливість реалізації їх масового (поточного) контролю в процесі виробництва. Крім того, стає можливим контроль поверхневих дефектів і в процесі експлуатації різного роду об'єктів.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Ґрунтовний аналіз фізичних процесів при збудженні коронного розряду в системі електродів вістря-площина наведено в [1, 2]. Розглянемо відповідно до [1] утворення від'ємної корони на вістрі у

повітрі. Розвиток процесу у часі розіб'ємо на кілька фаз.

У першій фазі при зростанні електричного поля від'ємного вістря до певної величини додатний іон при ударі об поверхню катоду може вибити вторинний електрон. Цей електрон починає віддалятись від вістря та іонізувати газ під час зіткнень. Утворюється електронна лавина.

Розглянемо особливості першої фази. В сильному полі поблизу вістря електрон є джерелом підсиленої іонізації, проте кумулятивний ефект лавини стає помітним лише після того, як вивільнені електрони пройдуть кілька дистанцій вільного пробігу від вістря. Кількість вивільнених електронів n залежить від відстані x:

$$n = \exp(\alpha x), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт розмноження електронів на одиницю довжини або перший коефіцієнт іонізації Таунсенда.

Відповідно до формули (1) лавинний струм має нескінченно зростати за експонентою при зростанні розрядного проміжку, проте цьому заважають супутні процеси.

Так, при віддаленні лавини, іонізуюче поле послаблюється з двох причин: по-перше, електричне поле швидко спадає із зростанням відстані, а по-друге, тому, що віддалені електрони залишають позаду себе малорухомі додатні іони, просторовий заряд яких послаблює електричне поле.

На початку другої фази електрони рухаються від вістря і залишають позаду хмаринку додатних іонів, густина яких спочатку за експонентою, а потім лінійно спадає по мірі віддалення від вістря. Затримані іонним просторовим зарядом електрони гальмують і прилипають до молекул кисню, утворюючи повільні від'ємні іони, які дрейфують до додатного електроду.

Електричне поле між поверхнею вістря та додатним просторовим зарядом накладається на поле розрядного проміжку, яке діє на електрони поблизу вістря. Додатні іони сягають катоду і кількість емітованих з нього електронів збільшується, що викликає появу нових лавин. Утворені лавини збільшують як іонізацію, так і просторовий заряд поблизу катоду, а також значно зменшують іонізацію у об'ємі подалі від вістря – за додатним просторовим зарядом. Тим часом, додатний просторовий заряд повільно рухається у напрямі до поверхні катоду.

При переході до третьої фази утворення послідовних лавин супроводжується розповсюдженням лавин по поверхні внаслідок їх бічного руху. В третій фазі просторовий заряд сягає катоду і процес іонізації практично припиняється після того, як додатні іони віддадуть свій заряд катоду.

В четвертій фазі електричне поле знову підсилюється внаслідок ліквідації додатних іонів, останні з яких дають початок новим електронним лавинам і створюються умови для повторного збудження коронного розряду. Знову починається його перша фаза.

Внаслідок утворення і руху просторового заряду виникають пульсації струму і ми спостерігаємо періодичні розряди. Частота пульсацій знаходиться в діапазоні від 5 000 до 200 000 Гц. Оцінка часу, необхідного для утворення лавини, дає значення 2-3 нс.

Для бічного і послідовного розповсюдження лавин необхідно від 10 до 100 нс. За той самий час просторовий додатний заряд сягає катоду.

Вістря у дослідах мали діаметр від 0,03 мм до 4,7 мм при розрядному проміжку 6 см. Напруженість поля була задана в діапазоні від 0 до 25 кВ/см. Кількість електронів в окремих лавинах зростала від 10 для найбільшого вістря до 10 000 для найменшого вістря.

Одночасно із іонізацією значна кількість атомів збуджується електронами і випромінює фотони. Випромінювання має пурпурні кольори що свідчить про іонізацію азоту та окису азоту. Спостерігають так званий «іскровий спектр» повітря біля катоду.

У [2] надано схему, запропоновану Тричелом (рис. 1), для вимірювання струму і напруги коронного розряду, для чого послідовно з розрядним проміжком вмикають опір R1 =1 кОм та паралельне коло із опорів R3, R4. З додаткового послідовного опору R2 = 10 кОм знімають сигнал від струму корони для подальшого підсилення і осцилографічного контролю імпульсів струму. Встановлено, що струм корони в повітрі при малих величинах складається із серії регулярних імпульсів, частота яких лінійно зростає із зростанням середнього значення струму і дорівнює 50 кГц при струмі 10 мкА та 100 кГц при 20 мкА. Частота імпульсів мало залежить від довжини розрядного проміжку для даного вістря, проте значно збільшується із зменшенням радіусу півсферичного кінця вістря.

Імпульс, отриманий у вигляді стрибка напруги на опорі, який ввімкнено послідовно із коронним проміжком, може бути викликаним не тільки струмом провідності, але і струмом зміщення [2]. Для розрахунку струму зміщення необхідно попередньо визначити електричну ємність між додатним і від'ємним електродами розрядного пристрою. Ємність може дорівнювати 10 пФ і більше. Для окремого коронного розряду із напругою 10 кВ і струмом у 100 мкА складова струму зміщення дорівнює складовій струму провідності вже при частоті імпульсів f = 200 Гц. При зменшенні загального струму розряду струм зміщення може значно перевищувати струм провідності на частотах f < 200 Гц.

В [2] наведено мінімальну напруженість поля, при якій виникає від'ємна корона у повітрі для розрядного проміжку 0,5-8 см. Так, для вістря з радіусом 0,47 мм необхідна напруженість поля дорівнює 6 200 В/см, для вістря з радіусом 0,05 мм вона дорівнює 17 300 В/см і для вістря з радіусом 0,012 мм напруженість поля складає 38 000 В/см. При цьому ми нехтуємо залежністю напруженості від ширини розрядного проміжку, оскільки відносна похибка при такому припущенні не перевищує 2%.

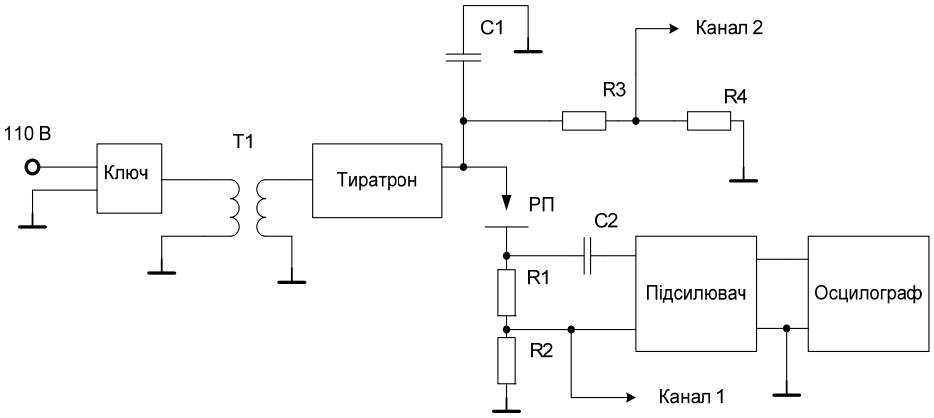


Рис. 1. Схема Тричела для дослідження від'ємної корони в системі вістря-площина: РП – розрядний пристрій; канал 1 – коло вимірювання струму; канал 2 – коло вимірювання напруги; Т1 – імпульсний трансформатор; С1 – розрядна високовольтна ємність; С2 – прохідна ємність для фільтрації постійної складової сигналу

Для системи коаксиальних електродів (дріт – циліндрична труба) отримані вольт-амперні характеристики від'ємного коронного розряду у повітрі, які мають вигляд прямих ліній [3]. Там же наведено величину активного опору розряду, яка дорівнює 60 кОм при тиску в 1/6 від атмосферного. Для системи електродів вістря-площина слід також очікувати наближеної до лінійної залежності для вольт-амперної характеристики розряду.

При зростанні напруги коронний розряд переходить у іскровий розряд, коли між електродами виникає пробій і проскакує іскра. Якщо після гасіння розряду напруга на електродах відновлюється, то пробій повторюється. Цей процес є характерним для періодично-імпульсного методу збудження розряду. Якщо джерело живлення має достатню потужність і може забезпечити протікання сильного струму тривалий час, то від струму іскри виникає катодна пляма і підпалюється дуговий розряд. Взагалі стан плазми у сформованому каналі навіть для швидкоплинного іскрового розряду схожий на стан у стовпі дуги, тому деякі автори розглядають кінцеву стадію іскрового розряду як імпульсну дугу [4].

Першою стадією іскрового розряду і стадією розвитку коронного розряду в іскровий є процес стримерного пробою. Основи стримерної теорії закладено в роботах [1, 2, 5], яка базується на уявленні про появу і зростання між електродами тонкого іонізованого каналу – стримера (від stream – потік), який прокладає собі шлях услід першої потужної лавини. У цей слід втягуються електрони вторинних лавин. Лавини зароджуються поблизу сліду від електронів, які вивільняються під дією фотонів, що випромінюють збуджені при проходженні першої і вторинних лавин атоми.

На комплексний характер механізму іскрового пробою вказує Ретер [5], який розділяє механізм генерації великої кількості (приблизно 100) лавин (таунсендівський механізм) та швидкий механізм, при якому вже перша лавина викликає стримерний або канальний механізм. Проте, існують і варіації цих форм, які є перехідними між обома механізмами.

Процес утворення лавин та розвитку корони через стримерну фазу до іскрового розряду для різних газів та їх сумішей при різному тиску досліджено Ретером [5] в камері Вільсона. Через кварцове вікно камери вимірювали часові параметри процесу із використанням електрооптичного затвору Керра та швидкісного фотоапарату. Мік та Крегс [2] досліджували іскровий розряд за допомогою фотопомножувача та осцилографа. Була виміряна швидкість розповсюдження стримерів в повітрі, яка змінювалась від $1{,}4 \cdot 10^6$ м/с для проміжку в 2 см до $6{,}6 \cdot 10^6$ м/с для проміжку в 12 см. Іскровий канал повністю формується за 53 нс. Час світіння імпульсної корони дорівнює 0,5 мкс.

Осцилограми струму в умовах стримерного пробою повітря при ширині розрядного проміжку 9 см виявили наступний ефект [5]. Після короткого піку від першої лавини протягом 10 мкс тече малий «запізнений» струм (як встановлено, він переноситься електронами). Осцилограма завершується стрибкоподібним зростанням струму – пробоєм. Затримка у виникненні стримера і пробою пов'язана із прилипанням, внаслідок якого виникають від'ємні іони, які компенсують значною мірою додатний заряд іонного сліду стримера. Потім електрони відлипають і виникає запізнений струм.

Характеристики стримерів, які розвиваються від додатного та від'ємного електродів на поверхні фотопластинки при одночасному контакті їх з нею, вивчають за фігурами Ліхтенберга, що утворюються в емульсійному шарі фотопластинки [2]. Цей тип розряду віднесено до поверхневого коронного, який збуджують при подачі імпульсної напруги на електроди. Поверхневий коронний розряд ковзає уздовж діелектрика (ебоніту , скла) і виникає, коли один із електродів, наприклад, у формі стрижня, має опору на діелектричну пластину, а інший електрод – металева обкладинка на її протилежній стороні. Розвинені розрядні канали в газі притискаються до діелектрика, розбігаються від стрижня і обтікають пластину до обкладинки на її протилежній стороні.

При застосуванні плоско-паралельних електродів на високих частотах виникає високочастотний ємнісний розряд, який внаслідок пробою може бути високоточним [5]. У випадку середнього та високого тиску та достатньо високої частоти поля електрони мають велику кількість ударів з молекулами газу та

дрейфують у вигляді хмаринки в фазі з полем. Таким чином, розрядний струм може бути модульованим високою частотою. При збільшенні напруги виникає пробій. Френсис наводить середньоквадратичне значення високочастотної напруги пробою для повітря при атмосферному тиску в межах 800-1000 В для розрядного проміжку 0,1-0,5 мм [6]. На жаль, він не надає точного значення частоти, яку ми можемо оцінити приблизно у 2–10 МГц і вище.

Як зазначалось вище, іскровий розряд є результатом розвитку коронного розряду. Математичні моделі іскрового розряду наведено у [7]. Ці моделі побудовано на основі уявлень про стримерний механізм розвитку розряду. Новим важливим внеском до стримерної теорії став розгляд стримера як хвилі іонізації.

Структуру іскрового розряду в повітрі для розрядних проміжків з довжиною у кілька метрів при постійній напрузі досліджено в [8]. Там же наведено мінімальну напруженість електричного поля, за якої можливий розвиток електронної лавини, а саме 23 кВ/см. Розвиток лавини, як ми знаємо, є необхідною умовою утворення корони. В структурі іскрового заряду виділено новий важливий рухомий елемент, від якого відділяються стримери. Цей елемент названо лідером. Для опису іскрового розряду та пробою створено теорію стримерно-лідерного переходу.

Загальна картина розвитку імпульсного пробою газів, наведена в [9]. При цьому разом із стримерним важливим механізмом пробою визначено об’ємний (таунсендівський) пробій, якому і присвячено більшу частину дослідження.

Газорозрядний метод візуалізації на основі застосування рідкого прозорого електроду (електроліт у кварцовій кюветі) розглянуто в [10]. Застосовані тут підходи до отримання і розшифрування зображень, на наш погляд, можуть бути корисними при розробці і використанні розрядного пристрою на основі тонко плівкового прозорого електроду на склі.

Перспективними об’єктами контролю методом газорозрядної візуалізації є мікродроти та нитки з провідних та діелектричних матеріалів [11]. Досі єдиним конструктивним рішенням для розрядного пристрою вважали систему електродів нитка-циліндр. На нашу думку, зручним інструментом контролю ниткоподібних об’єктів може бути система плоских електродів, один із яких є тонко плівковий прозорий електрод на склі.

В сучасних працях з високовольтних технологій [12–16] узагальнено досвід попередніх дослідників фізики газового розряду та додано результати розв’язання спеціальних задач.

Підсумовуючи наведений короткий огляд, на нашу думку, можна зробити такі висновки:

- коронний розряд розвивається у іскровий і його необхідно розглядати у зв’язку із іскровим пробоєм на основі теорії лавин та стримерів;
- складність процесу протікання та різноманітність умов збудження спонукає до пошуку нових і вдосконаленні вже існуючих методів і засобів вимірювання параметрів коронного розряду;
- візуалізація коронного розряду є основою для застосування телевізійного методу, проте одночасно з цим доцільним є осцилографічне вимірювання електричних і часових параметрів, тобто можливий комплексний підхід до створення інструментально-методичної бази досліджень коронного розряду.

Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження – процес збудження коронного розряду для газорозрядної візуалізації дефектів.

Мета дослідження – вдосконалення конструкції газорозрядного пристрою та пошук оптимального режиму збудження коронного розряду..

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Виконати аналіз конструктивних рішень існуючих пристроїв збудження коронного розряду для газорозрядної візуалізації.
2. Окреслити можливості нових конструктивних і схемних рішень для задач комплексного контролю дефектів телевізійним і осцилографічним методами на основі збудження коронного розряду.
3. Здійснити експериментальну перевірку нових рішень на реальному макетному зразку.
4. Визначити напрями наступних досліджень.

Газорозрядний пристрій із рідким прозорим електродом та аналіз його недоліків

Для отримання зображень збудженої корони у фронтальній площині об’єкту дослідження верхній електрод виконують прозорим. До нашого часу в деталях відпрацьована технологія рідкого електроду на основі електроліту, розміщеного у прозорій кюветі, та створені математичні моделі протікання струму через механізм пробою у діелектрику [10]. Також розроблена теорія для системи плоских електродів, які відокремлені від розрядного проміжку шаром діелектрика [4]. Розглянемо конструкцію та характеристики системи із рідким електродом на конкретних прикладах.

Розрядно-оптичний пристрій на основі рідкого електроду (прозорої кювети із кварцового скла, заповненої електролітом) був розроблений для контролю дефектів кремнієвих пластин [17]. Пристрій (Рис. 2) містить оптичну систему у вигляді фокону (5), вхідним торцем якого є рідкий струмопровідний електрод (2), оптично прозорий в обраному діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання, діаметром не менше діаметра досліджуваної пластини, відділений від навколишнього середовища скляним розрядним проміжком (3). Вихідна площина фокону (6) межує зі світловодом (7). Сигнал з генератора напруги надходить до рідкого електроду через контакт (4). Вся конструкція змонтована у корпусі (7).

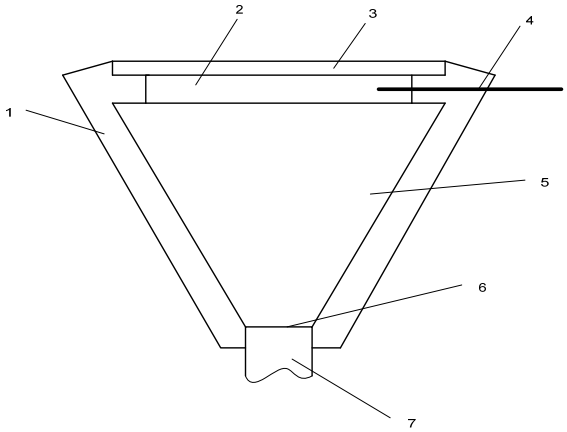


Рис. 2. Схема розрядно-оптичного пристрою для загального (інтегрального) аналізу якості пластин із монокристалічного кремнію: конструкція типу «фокон»

Об'єктом контролю тут є пластини кремнію. Попереднє калібрування установки здійснюється на еталонній пластині, яка не має дефектів. Досліджувана пластина розміщується на склі у розрядному проміжку, при цьому фіксується оптична потужність, що генерується нею в умовах накладеного поля, яка потім порівнюється з еталонною [17] .

Похибка вимірювань визначається точністю вимірювача потужності оптичного випромінювання і становить ± 15% з довірчою ймовірністю P = 0,95. Тривалість контролю - кілька секунд.

В [17] було визначено, що найбільш різке зображення неоднорідностей на фотопластині отримують при величині розрядного проміжку від 40 мкм до 3,2 мм і амплітуді напруги від 6 до 13,5 кВ. Частота імпульсів дорівнювала 20±5 кгц.

Аналіз конструкції та принципу дії розрядно-оптичних пристроїв на основі рідкого електроду висвітлює такі недоліки:

- мале поле зору та необхідність сканування поверхні об'єкту дослідження;
- складність конструкції через наявність кювети із рідиною та проблематичність створення мобільного варіанту приладу;
- збільшення похибки вимірювання через введення до оптичного тракту додаткових елементів;
- складність математичної моделі протікання струму через наявність в колі двох шарів діелектрика та електроліту.

Збудження імпульсного коронного розряду в пристрої з тонко плівковим прозорим електродом

Зазначені вище недоліки системи із рідким електродом спонукали до пошуку конструкції із «сухим» прозорим електродом на основі тонкої плівки окису індію (ITO – indium thin oxide). Для пошуку режимів збудження корони було створено макетний зразок спрощеної конструкції, де високовольтний електрод має точковий контакт із плівкою ITO, а низьковольтний (заземлений) електрод із мідної фольги наклеєний на протилежний бік скляної пластини. Між заземленим електродом і склом утворюється тонкий (10–200 мкм) повітряний простір, у якому збуджується імпульсний коронний розряд (рис. 3).

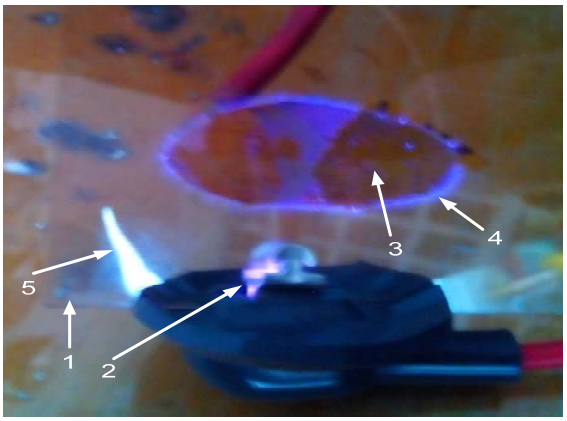
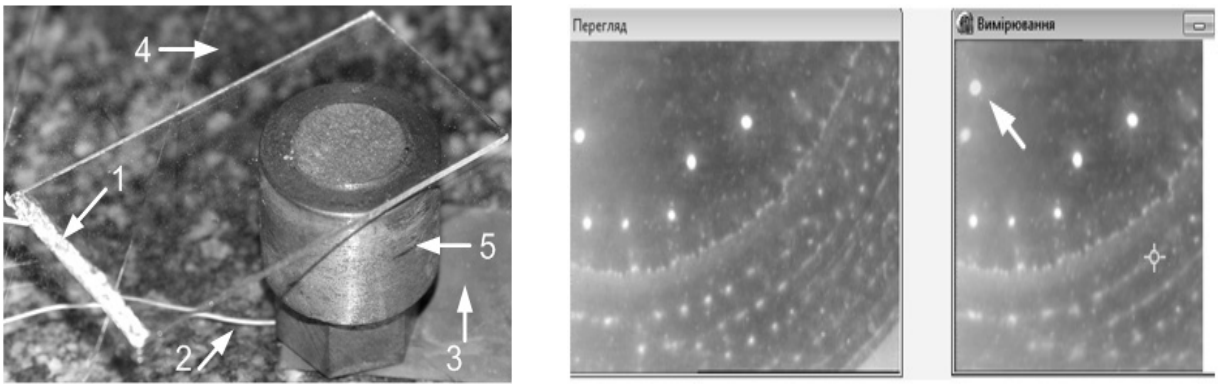


Рис. 3. Збудження коронного розряду в системі із тонко плівковим прозорим електродом: 1 – скляна пластина із нанесеним прозорим електродом ITO (indium thin oxide); 2 – високовольтний додатний електрод, прикладений до прозорого електроду; 3 – від'ємний заземлений мідний електрод, наклеєний на скляну пластину; 4 – корона на границі мідного електроду; 5 – поверхневий іскровий розряд, який розвивається в дугу

Коронний розряд виникає над тими місцями поверхні, де є механічні ушкодження, внаслідок яких створюється неоднорідність електричного поля із великою напруженістю (E $\geq$ 30 кВ/см). Таку напруженість створює структура поверхні, яку можна представити як сукупність загострених мікроскопічних голок.

Таким чином, систему плоско-паралельних електродів можна розглядати як систему множини вістер і площини. Для побудови моделі такої складної системи, на нашу думку, придатна модель вістря-площина, детальний розгляд якої наведено в [18].

Коронний розряд може супроводжувати поверхневий іскровий розряд, який при великому струмі переростає в дуговий розряд (рис. 3). Це викликає необхідність пошуку таких режимів збудження коронного розряду, які запобігають від виникнення дуги.



а) **б)**

Рис. 4. процес газорозрядної візуалізації зруйнованого штоку вузла впорскування термопластавтомату: а) розрядний пристрій: 1- прозорий електрод із напаяною шиною; 2 – шина заземлення; 3 – негативний електрод; 4 – ізолююче скло; 5 – об'єкт контролю; б) – коронний розряд над дефектами поверхні, що мають загострену форму, зображення отримане у вікні програми OwlEye: стрілка вказує на рухомий іскровий розряд

Нами досліджено коронний розряд над поверхнею зруйнованого штоку вузла впорскування термопластавтомату. Поверхня має численні дефекти, які утворюють множину загострених мікроконусів. Отримано також телевізійні зображення корони (рис. 4), які потім були оброблені програмою OwlEye.

При цьому режим збудження коронного розряду мав такі особливості: імпульсну напругу збудження зменшено до 900–1200 В при частоті імпульсів 8 кГц та шпаруватості 4-4,5;

Електрична схема пристрою збудження коронного розряду побудована на імпульсному високовольтному трансформаторі, первинна обмотка якого є навантаженням для колекторного кола потужного високовольтного транзистора (IGBT). Імпульси на затвор транзистора ідуть від генератора на таймері NE555. Вторинна обмотка трансформатора з'єднана із електродами розрядного пристрою.

Наступні модифікації схеми збудження дозволили виміряти струм розряду і його часові параметри. Схема вимірювання в основному повторювала схему Тричела (рис. 1). В результаті отримано осцилограми струму розряду і напруги на виході трансформатору(рис. 5).

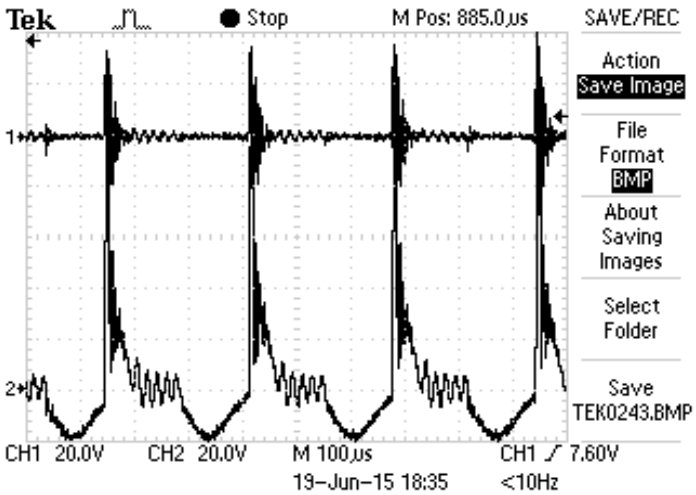


Рис. 5. Осцилограми струму коронного розряду (канал 1) і напруги на виході імпульсного трансформатора (канал 2)

Струм коронного розряду має пульсуючу форму із зміною полярності та спадаючою амплітудою. Частота коливань дорівнює 140 кГц. Імпульс із найбільшою амплітудою у 75 мА утворюється при вимиканні транзисторного ключа в колі високовольтного трансформатора. Частота вмикання ключа та збудження розряду була незмінною і дорівнювала 8 кГц.

Обговорення результатів та напрямку наступних досліджень

В результаті проведених досліджень створено діючий макет пристрою імпульсного збудження коронного розряду на основі системи плоско-паралельних електродів, один із яких є прозорим. В конструкції пристрою застосовано тонко плівковий прозорий електрод, який утворено методом вакуумного

напилення на скляну підкладку.

Схема пристрою придатна для осцилографічного контролю. Отримані осцилограми струму розряду дозволили виміряти амплітуду і частоту розрядного струму.

Розроблений пристрій є платформою для створення модуля газорозрядної візуалізації у складі телевізійної вимірювальної системи. Разом із осцилографічним, телевізійний метод утворює основу інструментально-методичного комплексу для контролю поверхневих дефектів та вимірювання їх параметрів.

Основними задачами наступних досліджень, на нашу думку, є:

- пониження напруги збудження коронного розряду;
- визначення оптимальної частоти, шпаруватості та крутизни імпульсів збудження розряду;
- регулювання і придушення іскрового розряду, у який розвивається коронний розряд;
- запобігання збудження поверхневого іскрового та дугового розрядів;
- визначення залежності розрядного струму від яскравості корони;
- створення математичної моделі в системі вістря-площина для множини загострених електродів та із врахуванням діелектричного шару в розрядному проміжку;
- розробка мобільного засобу контролю.

Висновки

На основі аналізу джерел з фізики коронного розряду, визначено напрями вдосконалення розрядно-оптичних пристроїв. Зокрема, на основі імпульсного збудження розряду та застосування «сухого» прозорого електроду створено діючий макет пристрою для застосування в газорозрядній візуалізації дефектів.

На наш погляд, методи і засоби газорозрядної візуалізації можуть вийти на новий рівень за своїми функціональними можливості при застосуванні їх у комплексі з телевізійними і осцилографічними методами і засобами. Таким чином, є підґрунтя для створення контрольно-вимірювального комплексу, основою якого можуть стати вже існуючі телевізійні інформаційно-вимірювальні системи.

Експериментально підтверджено коливальний характер струму коронного розряду при імпульсному збудженні. Наголошено про необхідність створення нової моделі коронного розряду на основі системи із множини голок (вістер) і площини.

Література

1. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах / Леб Л. – М. : Гос. тех. издат., 1950. – 672 с.

2. Мик Дж. Электрический пробой в газах /Дж. Мик, Дж. Крэгс. – М. : Изд. иностр. лит., 1960. – 608 с.

3. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда / Браун С. – М. : Атомиздат, 1961. – 324 с.

4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Райзер Ю.П. – М. : Наука, 1992. – 536 с.

5. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах / Ретер Г. – М. : Мир, 1968. – 392 с.

6. Френсис Г. Ионизационные явления в газах / Френсис Г. – М. : Атомиздат, 1964. – 303 с.

7. Лозанский Э.Д. Теория искры / Э.Д. Лозанский, О.Б. Фирсов. – М. : Атомиздат, 1975. – 272 с.

8. Базелян Э.М. Искровой разряд в воздухе / Э.М. Базелян, И.М. Ражанский. – Нсб : Наука, 1988. – 164 с.

9. Королев Ю.Д. Физика импульсного пробоя газов / Ю.Д. Королев, Г.А. Месяц. – М. : Наука, 1991. – 224 с.

10. Кожаринов В.В. Электроразрядный метод визуализации / В.В. Кожаринов, Н.Н. Зацепин, Н.Е. Домород. – Минск, 1986. – 134 с.

11. Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах / Бахтаев Ш.А. – Алма-Ата, 1984. – 208 с.

12. Базелян Э.М. Искровой разряд. / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М. : Изд. МФТИ, 1997. – 320 с.

13. Reizer Ju.P. Gas Discharge Physics. Springer. 2001. 449 p.

14. Kuffel E. High Voltage Engineering / E. Kuffel, W. Zaengl, J. Kuffel. – Oxford : Newnes, 2000. – 539 p.

15. Naidu M. High Voltage Engineering / M. Naidu, V. Kamaraju. – New York : McGraw-Hill, 1996. – 378 p.

16. Advances in High Voltage Engineering. Ed. by Haddad A. and Warne D. IET. – 552 p.

17. Добровольский Ю.Г. Использование эффекта Кирлиан для контроля качества полупроводниковых пластин / Ю.Г. Добровольский // ТКЭА. – 1999. – № 5-6. – С. 22–24.

18. Болтачев Г.Ш. Аналитическая модель коронного разряда с конического электрода в режиме насыщения / Г.Ш. Болтачев, Н.М. Зубарев // ЖТФ. – 2012. – Т. 82, вып. 11. – С. 28–37.

Рецензія/Peer review : 10.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 621

К.Л. ГОРЯЩЕНКО, С.Л. ГОРЯЩЕНКО
Хмельницький національний університет, Україна

ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ СКЛАДОВИХ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ФАЗОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Відомо, що фазові методи вимірювання відстаней є точним методом. Останнім часом розроблено теоретичні та практичні аспекти застосування фазових вимірювань для визначення декількох об'єктів одночасно. Проте існуючі методи та теоретичні обґрунтування застосування фазових методів вимірювання показують принципові проблеми їх практичної імплементації. Суттєвою проблемою є направленість представлених методів для визначення об'єктів, що мають еквівалентну "точкову" модель відбиття. Для об'єктів з складним відбиттям ці методи показують принципову недосконалість.

Ключові слова: пошкодження, кут зсуву фази.

K.L. HORIASHCHENKO, S.L. HORIASHCHENKO
Khmelnitsky national university, Ukraine

PROBLEMS OF DETECTION OF SIGNAL COMPONENTS IN EXISTING METHODS FOR OUTPUT SIGNAL OF THE PHASE MEASUREMENT

It is known that the phase distance measurement technique is an accurate method. Recently developed theoretical and practical aspects of phase measurements to determine the multiple objects simultaneously. However, existing methods and theoretical justification for the use of phase measurement methods show fundamental problems of their practical implementation. The essential problem is the orientation of the presented methods to determine the objects that have an equivalent "point" model of reflection. For objects with complex reflection of these methods show a fundamental imperfection.

Keywords: damage, phase angle.

Вступ

Фазові методи потенційно здатні виявити декілька об’єктів. Багаточастотний фазовий метод забезпечує високу розрізнювальну спроможність для одного об’єкта. Але визначення кількох пошкоджень фазовим методом є складним. Проведені дослідження [3] показують можливість існування вирішення прямої задачі аналізу впливу параметрів об’єктів – дальності та коефіцієнту відбиття – на параметри сумарного гармонійного сигналу. Але, з точки зору вимірювання дальності та коефіцієнтів відбиття об’єктів, актуальною є саме обернена задача: за отриманими амплітудно-частотною або фазочастотною характеристиками відновити значення векторів сигналів відбиттів від об’єктів та розрахувати дальності та встановити коефіцієнти відбиття, що далі дають змогу встановити величину відбиття в дійсності, а отже й достовірно встановити тип пошкодження.

Отже задачею є пошук загальних підходів до вирішення оберненої задачі визначення дальності та коефіцієнтів відбиття об’єктів шляхом аналізу і математичних перетворень амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик сумарного сигналу. Для вирішення поставленої задачі пропонується скористатись знайденими особливостями зміни частотних характеристик сигналів та розв’язанням рівнянь записаними на основі аналітичних залежностей отриманими в попередньому розділі.

Основна частина

Згідно робіт [2, 3, 4, 6] встановлена можливість вимірювати два і більше пошкоджень у лініях зв’язку за допомогою фазових вимірювань.

Вирішення зворотної задачі потребує пошуку методів розв’язання рівнянь виду:

$$s_{\text{від}\Sigma}(t) = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + a_2 \cos(\omega t + \varphi_2). \quad (1)$$

Ітераційні фазочастотні методи вимірювання дальності об’єктів

В загальному випадку дані рівняння мають 2n невідомих, де n – кількість об’єктів вимірювання. Тому необхідно записати ще декілька рівнянь, кількість яких повинна дорівнювати кількості невідомих або більше них. При проведенні вимірювань ми не можемо забезпечити вимірювання амплітудно-частотної та фазочастотної характеристик у всіх точках частотного діапазону. Сучасні підходи до проведення вимірювань передбачають ступеневу зміну частоти шляхом перестройки синтезатора частоти. Тому при проведенні вимірювань можна отримати дискретні значення амплітуди та фазового зсуву сумарного сигналу. Із використанням отриманих значень можна записати системи рівнянь в тригонометричній або експоненційній формах [4, 3]:

$$\begin{cases} U_{\Sigma 1}\sin\varphi_{\Sigma 1} = U_1\sin\varphi_1 + U_2\sin\varphi_2 + \ldots + U_n\sin\varphi_n, \\ U_{\Sigma 2}\sin\varphi_{\Sigma 2} = U_1\sin 2\varphi_1 + U_2\sin 2\varphi_2 + \ldots + U_n\sin 2\varphi_n, \\ \ldots \\ U_{\Sigma n}\sin\varphi_{\Sigma n} = U_1\sin n\varphi_1 + U_2\sin n\varphi_2 + \ldots + U_n\sin n\varphi_n, \\ U_{\Sigma 1}\cos\varphi_{\Sigma 1} = U_1\cos\varphi_1 + U_2\cos\varphi_2 + \ldots + U_n\cos\varphi_n, \\ U_{\Sigma 2}\cos\varphi_{\Sigma 2} = U_1\cos 2\varphi_1 + U_2\cos 2\varphi_2 + \ldots + U_n\cos 2\varphi_n, \\ \ldots \\ U_{\Sigma n}\cos\varphi_{\Sigma n} = U_1\cos n\varphi_1 + U_2\cos n\varphi_2 + \ldots + U_n\cos n\varphi_n, \end{cases} \quad (2)$$

Розглядаючи дані системи рівнянь, видно що вони є нелінійними. Розв'язання нелінійних систем рівнянь в кожному окремому випадку необхідно шукати відповідно до системи і загальних підходів не існує.

Ітераційний метод розв'язку системи рівнянь (2) полягає у поступовому розв'язку із застосуванням представленого в роботах [2, 3, 4] за допомогою математичного апарату розв'язку систем рівнянь виду [4, 3] (для випадку 3-х об'єктів, кожний з яких має "точковий" характер відбиття):

$$\begin{cases} f_1(a_1,\varphi_1,\varphi_2) = a_1\sin\varphi_1 + (a_{\Sigma 0} - a_1)\sin\varphi_2 - a_{\Sigma 1}\sin\varphi_{\Sigma 1} = 0; \\ f_2(a_1,\varphi_1,\varphi_2) = a_1\sin 2\varphi_1 + (U_{\Sigma 0} - a_1)\sin 2\varphi_2 - a_{\Sigma 2}\sin\varphi_{\Sigma 2} = 0; \\ f_3(a_1,\varphi_1,\varphi_2) = a_1\sin 3\varphi_1 + (U_{\Sigma 0} - a_1)\sin 3\varphi_2 - a_{\Sigma 3}\sin\varphi_{\Sigma 3} = 0. \end{cases}$$

Для розв'язку такої системи складається матриця Якобі [4, 2, 3]:

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial a_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) & a_1\cos\varphi_1 & (a_{\Sigma 0} - a_1)\cos\varphi_2 \\ (\sin 2\varphi_1 - \sin 2\varphi_2) & 2a_1\cos 2\varphi_1 & 2(a_{\Sigma 0} - a_1)\cos 2\varphi_2 \\ (\sin 3\varphi_1 - \sin 3\varphi_2) & 3a_1\cos 3\varphi_1 & 3(a_{\Sigma 0} - a_1)\cos 3\varphi_2 \end{bmatrix}.$$

Та шукається визначник для даної матриці Якобі:

$$\det W = \det\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right] \neq 0.$$

Запропонований у роботах [4, 2, 3] розв'язок можна використати тільки для ідеалізованого варіанту пошкодження лінії з наявними точковими пошкодженнями. В реальній лінії використання цього методу неможливе як с точки зору наявних пошкоджень, так і з боку необхідності ускладнення математичного апарату при наявності більшої кількості пошкоджень.

Метод послідовного наближення для фазового методу вимірювання дальності об'єктів

Іншим варіантом ітераційного методу є метод пошуку із використанням інформації щодо мінімумів та максимумів амплітуди суми відбитих сигналів. Так на Рис. 1 показано графік залежності амплітуди сум відбитих сигналів від частоти. Тому в роботах [4, 2, 3] показано можливість також використати ітераційний підхід в розв'язку системи (2).

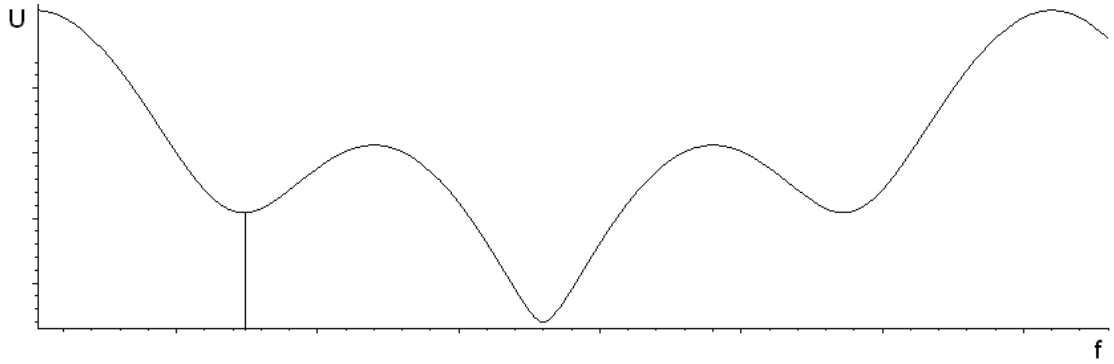


Рис. 1. Графік залежності амплітуди сум відбитих сигналів від частоти

Математична модель процесу вимірювання за методом послідовного наближення має вигляд [3]:

$$a_k = \frac{a_\Sigma}{2^N}\sum_{i=1}^{N} 2^{N-i}k_i,$$

де N – число розрядів регістру послідовного наближення;

a_Σ – максимальна вимірювана амплітуда сумарного сигналу на частоті f=0;

k_i – значення на виході амплітудного компаратора на *i*-у кроці врівноваження, приймає значення "0" або "1".

Аналіз математичної моделі методу послідовного наближення, показує, що з кожним кроком вимірювання точність підвищується у два рази. Алгоритм методу послідовного наближення для визначення амплітуди вектора третього відбитого сигналу полягає у наступному:

1. Вибирається напрямок додаткового компенсуючого вектору з вимоги його протифази вектору третього відбитого сигналу;

$$\varphi_k = \varphi_3 + 180° .$$

2. Встановлюється амплітуда компенсуючого вектору, що дорівнює половині амплітуди сумарного вектору відбитих сигналів на частоті *f*=0;

$$a_k = a_\Sigma / 2 .$$

3. Досліджується кривизна амплітудно-частотної характеристики сумарного відбитого сигналу з урахуванням компенсуючого вектора.

4. Якщо на характеристиці спостерігаються перепади, то вектор третього відбитого сигналу нескомпенсований. При введені компенсуючого вектору можливі наступні випадки:

- $\overline{a}_k = \overline{a}_3$ – повна компенсація вектору третього відбитого сигналу.
- $\overline{a}_k < \overline{a}_3$ – недокомпенсація вектору третього відбитого сигналу;
- $\overline{a}_k > \overline{a}_3$ – перекомпенсація вектору третього відбитого сигналу;

Таким чином, в методі послідовного наближення відбувається знову таки ітераційний процес визначення пошкоджень шляхом послідовної компенсації певної складової сигналу.

Проте і в цьому випадку, не дивлячись на значне спрощення методу розв'язання оберненої задачі, існують принципові проблеми:

1. На практиці похибка вимірювання кута зсуву фази досягає 0,01° ($2{,}7\times10^{-5}$), похибка вимірювання амплітуди – $\pm1/2^{16}$ ($1{,}5\times10^{-5}$) для цифрових вимірювальних пристроїв. Отже сумарна похибка визначення амплітуди, згідно з виразом (1), як функції виду $a_2\cos(\omega t+\varphi_2)$ буде складати не менше $4{,}2\times10^{-5}$.

2. Оскільки згідно з виразом (1) має місце залежність виду $a_2\cos(\omega t+\varphi_2)$, то на кінцеву точність визначення амплітуди вектору, буде також впливати швидкість приросту функції cos при зміні $(\omega t+\varphi_2)$. При значеннях $(\omega t+\varphi_2)\to\frac{\pi}{2}$ ($\cos(\omega t+\varphi_2)\to 0$), потрібна точність визначення амплітуди зростає багатократно, а тому оцінка адекватності компенсації в цих точках є ускладненою.

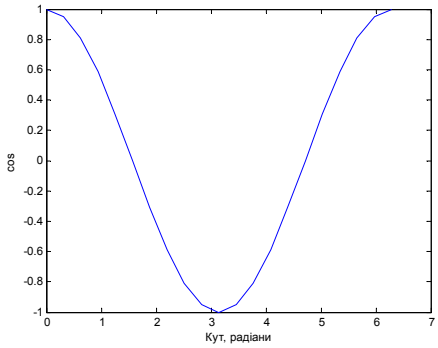


Рис. 2. Графік функції cos

3. Існування двох пошкоджень або групи пошкоджень, що розміщуються досить близько один від одного ускладнюють процес компенсації через складність їх розрізнення.

Висновок

Представлені методи – методи визначення елементів матриці із застосуванням визначника матриці Якобі та метод компенсації є ітераційними методами. Вони володіють принциповими та ідентичними проблемами:

1) наявність кількох розміщених рядом пошкоджень призводять до складності виявлення цього пошкодження та розділення його на дійсні складові.

2) похибка на старшому кроці призведе до виникнення похибки на всіх наступних кроках.

Тому ці методи є, не дивлячись на їхню теоретичну простоту є складними в обчислювальній реалізації, а їх застосування може видати хибний результат в результаті ітерацій.

Натомість, в роботі [7] показана теоретична можливість визначення спектральних складових у сумарному сигналі для багато шкального фазового методу аналізу стану лінії зв'язку.

Література

1. Гула I.V. Multicoincidence method for phase measuring devices with hiqh accuracy / I.V Gula, K. L. Horiashchenko, O.P. Vojtyuk / European applied sciences. – 2013. – №12. – С. 81-84.

2. Любчик В.Р. Вимірювання відстаней в радіолокації до трьох об'єктів / В.Р. Любчик, О.І. Гнатюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – №4. – Ч.1. – Т.1. – С. 239-242.

3. Любчик В.Р. Вимірювання відстаней до трьох об'єктів / В.Р. Любчик, О.І. Гнатюк //. – Вісник Технологічного університету Поділля. – №2. – 2005. – С.183-188

4. Любчик В.Р. Розробка фазового методу вимірювання відстаней до двох об'єктів // Вісник технологічного університету Поділля. – 2004. - № 2. – С. 108-114.

5. Маевский С.М. Прецизионное измерение электрической длины кабельной линии связи. Фазовые методы измерений в радиотехнике / С.М. Маевский, Е.К. Батуревич, В.Г. Баженов // Тр. РИ АН СССР, 1977. – №27. – С. 110-114

6. Маевский С.М. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний / С.М. Маевский, В.Г. Баженов, Е.К. Батуревич, Ю.В. Куц. – К.: Вища школа. Изд-во при Киев. ун-те, 1983. – 84 с.

7. Горященко К. Л. Аналіз спектральних складових сумарного сигналу для багатошкального фазового методу аналізу стану лінії зв'язку. Повідомлення 1 / К. Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 6, Т. 1. – С. 115-120.

Рецензія/Peer review : 3.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Троцишин І.В.

УДК 535.5

О.М. СТАЩУК, Д.М. СТЕПАНОВ, Д.Г. БАГАЧУК
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СКЛА ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА НА МАТЕРІАЛЬНУ ДИСПЕРСІЮ СИГНАЛУ

Проведено аналіз залежностей питомої матеріальної дисперсії сигналу від довжини робочої хвилі сигналу для ступеневих оптичних волокон різних за хімічним складом серцевини та оболонки. Встановлено вплив легуючих домішок на значення питомої матеріальної дисперсії сигналу.

Ключові слова: оптичне волокно, матеріальна дисперсія, хроматична дисперсія.

O. M. STASHCHUK, D. M. STEPANOV, D. G. BAGACHUK
Odessa A. S. Popov National Academy of Telecommunications

THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF GLASS OF OPTIC FIBER ON THE MATERIAL DISPERSION OF THE SIGNAL

An analysis of the material dispersion dependences on the wavelength of the signal for stepped optical fibers with different chemical compositions of the core and cladding. The influence of dopants on the value of the material dispersion of the signal has been determined.

Key words: optical fiber, material dispersion, chromatic dispersion.

Постановка задачі

Хроматична дисперсія сигналу є одним із основних параметрів передавання волоконно-оптичних систем передавання (ВОСП), що вносить обмеження на швидкість передавання інформації та на довжину регенераційної ділянки. Матеріальна дисперсія (МД) є однією з основних складових хроматичної дисперсії. Причиною виникнення МД є залежність показника заломлення матеріалу скла оптичного волокна (ОВ) від довжини робочої хвилі сигналу, що передається. Для отримання оптичних характеристик ОВ, що задовольняють міжнародним стандартам, та забезпечення явища повного внутрішнього відбиття (каналізації світла в межах серцевини ОВ) необхідно, в першу чергу, досягти необхідних значень показника заломлення серцевини n_1 та показника заломлення оболонки n_2 ОВ. Цього досягають шляхом внесення до хімічного складу серцевини та оболонки ОВ легуючих домішок в процесі виготовлення ОВ. Однак, наявність легуючих домішок в хімічному складі ОВ та їх концентрація суттєво впливає на значення МД сигналу в ОВ. Необхідно встановити характер впливу на МД для кожного типу домішок та визначити оптимальні хімічні склади ОВ.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідженню питомої МД присвячено низку наукових праць. В роботах [1, 2] отримано методику розрахунку питомої МД та встановлено спектральну залежність даного параметра. В роботі [3] представлено фізику процесів при впливі МД на форму оптичного інформаційного імпульсу. В роботі [4] представлено фізичну суть та наведено методику розрахунку довжини хвилі нульової дисперсії. Однак, в перерахованих

джерелах не наведено аналіз впливу різного виду домішок на значення питомої МД. Не вказано переваги та недоліки кожного виду домішок на дисперсійні характеристики ОВ.

Актуальність теми дослідження

Оскільки величина питомої МД в значній мірі впливає на величину хроматичної дисперсії, яка, в свою чергу, є основним обмежуючим фактором при передаванні інформації на значні відстані (на магістральних ВОСП), то питання зменшення МД представляє практичний інтерес. Оптимізація дисперсійних характеристик є однією із основних задач для виробників ОВ. Також, слід відзначити, що виробники ОВ не надають інформації щодо хімічного складу серцевини та оболонки ОВ, які на сьогодні виготовляються, тому для теоретичного обґрунтування доцільності використання в ВОСП волокон того чи іншого хімічного складу, слід провести аналіз їх дисперсійних характеристик.

Мета роботи

Метою роботи є встановлення прямої залежності питомої матеріальної дисперсії від довжини робочої хвилі сигналу, що передається для ОВ, різних за хімічним складом серцевини та оболонки. Для дослідження вибрано діапазон довжин хвиль 1,45 … 1,625 мкм. Рецепти ОВ, для яких проводились розрахунки наведено в табл. 1. Також метою роботи є встановлення довжини хвилі нульової МД для кожного із наведеного в табл. 1 ОВ.

Таблиця 1

Хімічні склади оптичних волокон, що вибрані для дослідження

№ п/п	Позначення ОВ	Склад серцевини	Склад оболонки
1	ОВ-1	100 % SiO_2	1 % F, 99 % SiO_2
2	ОВ-2	2,2% GeO_2, 3,3% B_2O_3, 94,5% SiO_2	3% B_2O_3, 97% SiO_2
3	ОВ-3	9,1% P_2O_5, 90,9% SiO_2	7% GeO_2, 93% SiO_2
4	ОВ-4	2,2% GeO_2, 3,3% B_2O_3, 94,5% SiO_2	13,5% BeO_2, 86,5% SiO_2
5	ОВ-5	0,1% GeO_2, 5,4% B_2O_3, 94,5% SiO_2	3,5% B_2O_3, 96,5% SiO_2
6	ОВ-6	4,03% GeO_2, 9,7% B_2O_3, 86,27% SiO_2	100% SiO_2
7	ОВ-7	3,3% GeO_2, 9,2% B_2O_3, 87,5% SiO_2	13,5% B_2O_3, 86,5% SiO_2 загартований
8	ОВ-8	3,5% GeO_2, 96,5% SiO_2	100% SiO_2 з гасячими домішками
9	ОВ-9	7,9% GeO_2, 92,1% SiO_2	5,8% GeO_2, 94,2% SiO_2

Методика розрахунку МД сигналу в ОВ

МД – це зміна форми інформаційного імпульсу при проходженні електромагнітної хвилі в ОВ, визначається залежністю показника заломлення від довжини хвилі, що, в свою чергу призводить до того, що різні довжини хвиль поширюються з різною швидкістю. МД може приймати як додатні, так і від'ємні значення. При додатніх значеннях МД відбувається збільшення тривалості інформаційного імпульсу, при від'ємних – зменшення його тривалості. І перший і другий випадки призводять до спотворення форми сигналу, є негативним явищем в ВОСП.

Для випадку ОВ з ідеальним ступеневим профілем показника заломлення, питому МД слід розраховувати за виразом [1]:

$$M = \frac{\lambda}{c}\left(\frac{\partial^2 n_1}{\partial \lambda^2} P_c + \frac{\partial^2 n_1^2}{\partial \lambda^2}(1 - P_c)\right), \quad (1)$$

де M – питома МД сигналу в ОВ, пс/(км·нм);

λ – довжина хвилі сигналу, що передається, мкм;

c – швидкість світла в вакуумі ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с);

n_1 – показник заломлення серцевини ОВ;

P_c – відносна частка потужності випромінювання, що поширюється в серцевині, мкВт.

$$n_1 = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^{3} A_i \lambda^2 \Big/ (\lambda^2 - l_i^2)}, \quad (2)$$

де Ai – коефіцієнт ряду Селмейєра для матеріалу серцевини ОВ;

li – коефіцієнт ряду Селмейєра для матеріалу серцевини ОВ, мкм;

λ – довжина робочої хвилі оптичного сигналу, мкм.

Для більшості рецептів складу скла ОВ параметри Ai та li наведені в [1, 2].

Формула для розрахунку питомої МД, що враховує лише хімічний склад ОВ та довжину хвилі оптичного сигналу має вигляд [1, 2]:

$$M = \frac{\lambda}{c}\frac{\partial^2 n_1}{\partial \lambda^2} = \frac{\lambda}{n_1 c}\left[\sum_{i=1}^{3} \frac{A_i l_i^2 \cdot (3\lambda^2 + l_i^2)}{(\lambda^2 - l_i^2)^3} - \left(\frac{\partial n_1}{\partial \lambda}\right)^2\right], \quad (3)$$

де

$$dn_1(\lambda)/(d\lambda) = -(\lambda/n_1)\left[\sum_{i=1}^{3} A_i l_i^2 / (\lambda^2 - l_i^2)^2\right]. \quad (4)$$

Таким чином, для визначення питомої МД достатньо використати коефіцієнти Селмейєра та значення робочої довжини хвилі оптичного сигналу.

Результати дослідження питомої МД в ОВ

За виразом (3) виконано обчислення питомої МД для ОВ, хімічні склади яких наведено в табл. 1. В результаті отримано форми залежностей питомої МД для довжин хвиль 1460 … 1625 нм, що включає в себе три діапазони ВОСП: короткохвильовий (short) – 1460 … 1530 нм, стандартний (conventional) – 1530 … 1565 нм, довгохвильовий (long) – 1565 … 1625 нм. Дані графіки представлено на рис. 1.

В табл. 2 наведено результати виконаних обчислень питомої МД.

Таблиця 2

Отримані значення питомої МД та довжина хвилі нульової МД для ОВ, що досліджувались

№ п/п	Номер ОВ	Питома МД при λ = 1460…1530 нм (short), пс/(км·нм)	Питома МД при λ = 1530…1565 нм (conventional), пс/(км·нм)	Питома МД при λ = 1565…1625 нм (long), пс/(км·нм)	Довжина хвилі нульової МД, λ_0, мкм
1	ОВ-1	-15,76 … -20,56	-20,56 … -22,85	-22,85 … -26,56	1,267
2	ОВ-2	-15,38 … -20,28	-20,28 … -22,59	-22,59 … -26,37	1,273
3	ОВ-3	-17,51 … -22,71	-22,71 … -25,19	-25,19 … -29,25	1,265
4	ОВ-4	-15,38 … -20,28	-20,28 … -22,59	-22,59 … -26,37	1,273
5	ОВ-5	-12,71 … -19,88	-19,88 … -22,21	-22,21 … -25,99	1,278
6	ОВ-6	-18,87 … -24,15	-24,15 … -26,66	-26,66 … -30,76	1,250
7	ОВ-7	-16,02 … -20,97	-20,97 … -23,32	-23,32 … -27,14	1,272
8	ОВ-8	-15,91 … -20,75	-20,75 … -23,05	-23,05 … -26,79	1,268
9	ОВ-9	-13,66 … -18,69	-18,69 … -21,07	-21,07 … -24,91	1,295

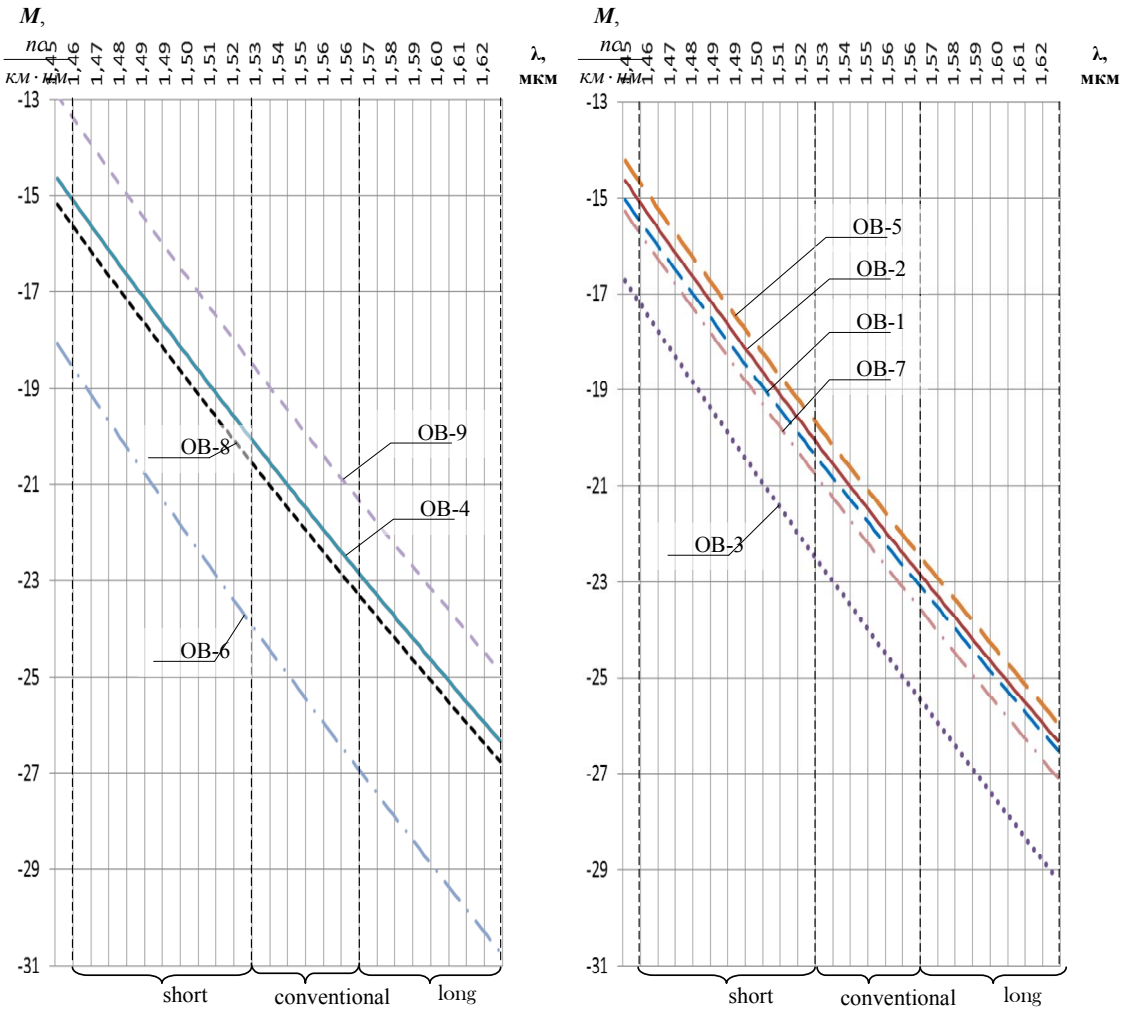


Рис. 1. Спектральні залежності питомої МД різних за хімічним складом ОВ

Висновки

Отримані результати проведених досліджень засвідчують про наступне:

1. В діапазоні довжин робочих хвиль 1,45 … 1,625 мкм питома МД для усіх ОВ, що досліджувались приймає від'ємне значення, що призводить до зменшення тривалості інформаційного імпульсу.

2. Добавка домішок окису фосфора до складу серцевини ОВ призводить до зростання за модулем питомої МД.

3. Добавка домішок окису германію без домішок окису бора призводить до зменшення за модулем питомої МД.

4. Добавка домішок окису германію разом з домішками окису бора може викликати як зменшення, так і збільшення питомої МД.

Матеріал роботи може бути використаний для розробки ОВ, а також, в якості довідника, для написання магістерських робіт, присвячених дослідженню дисперсійних характеристик ОВ.

Таким чином, встановлено вплив домішок різного типу та різної концентрації на значення питомої МД, яка є складовою питомої хроматичної дисперсії. Для повного аналізу можливості використання в ВОСП ОВ, що досліджувались в роботі, необхідно, крім МД, враховувати також хвилеводну і хроматичну дисперсії, що і планується виконати в наступних роботах.

Література

1. Корнейчук В. И. Оптические системы передачи / Корнейчук В. И., Макаров Т. В., Панфилов І. П. – К. : Техніка, 1994. – 388 с.

2. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов / Адамс М. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 512 с.

3. Корнейчук В.И. Волоконно-оптические системы передачи / Корнейчук В. И., Панфилов И.П. – Одесса : Друк, 2001. – 436 с.

4. Шереметьєв О.И. Когерентная волоконно-оптическая связь / Шереметьєв О.И. – М. : Радио и связь, 1991. – 192 с.

Рецензія/Peer review : 27.11.2015 р. Надрукована/Printed :6.12.2015 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Лісовий І.П.

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 № 4 від 26.11.2015 р.

Підп. до друку 8.12.2015 р. Ум.друк.арк. 19,63 Обл.-вид.арк. 25,53
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