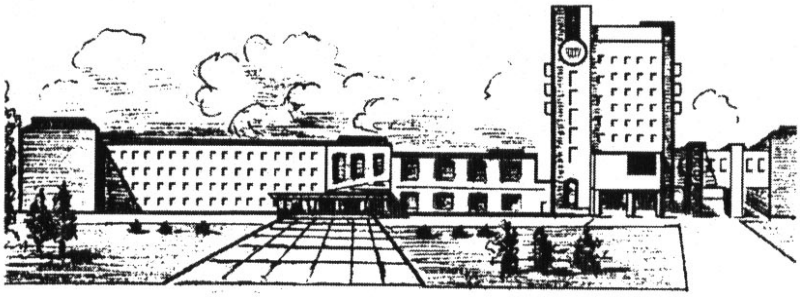
ISSN 2225-7551

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



В І С Н И К

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 2 (65)

Чернігів 2013

УДК 62/69+004
ББК 30/35
В53

Друкується за рішенням вченої ради університету (протокол № 6 від 01.07.2013 р.). «Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”» включено до нового переліку наукових фахових видань України, затвердженого постановою Президії ВАК України від 01.07.2010 р. № 1-05/5. Бюлетень ВАК України № 7, 2010.

З 2013 року «Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”» включений у міжнародну наукометричну базу даних eLIBRARY.RU (ліцензійний договір № 246-04/2013 від 29 квітня 2013 року).

Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки” : науковий збірник / Черніг. держ. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. держ. технол. ун-т, 2013. – № 2 (65). – 255 с.

В53

У цьому випуску «Вісника Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”» вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у галузях технічних наук: механіки, механохімії, інтегрованих технологій машинобудування та автотранспорту, технологій зварювання, інформаційно-комп’ютерних технологій, енергетики, технологій збереження природного середовища та легкої і харчової промисловості. Статті написані науковцями, аспірантами, магістрантами та студентами і прорецензовані провідними вченими вищих технічних навчальних закладів та закладів НАН України.

«Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”» буде корисним для науковців різних галузей технічних наук, науково-технічних працівників, аспірантів, магістрантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 62/69+004
ББК 30/35

Головний редактор:
Казимир В.В., доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи.

Заступник головного редактора:
Пилипенко О.І., доктор технічних наук, професор.

Члени редакційної колегії:
Болотов Г.П., доктор технічних наук, професор;
Волков І.В., доктор технічних наук, професор;
Денисов Ю.О., доктор технічних наук, професор;
Дубенець В.Г., доктор технічних наук, професор;
Дудла І.О., доктор технічних наук, доцент;
Кальченко В.І., доктор технічних наук, професор;
Кальченко В.В., доктор технічних наук, професор;
Литвинов В.В., доктор технічних наук, професор;
Сенько В.І., доктор технічних наук, професор;
Сиза О.І., доктор технічних наук, професор;
Скоробогатова В.І., доктор технічних наук, професор;
Харченко Г.К., доктор технічних наук, професор;
Чередніченко П.І., доктор технічних наук, професор.
John N. Davies, Professor, Department of Computer Science, Glyndwr University, Wrexham, U.K.

Заснований у 1996 році. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 14994-3966 ПР від 27.02.2009 р.

ISSN 2225-7551

© Колектив авторів, 2013
© Чернігівський державний технологічний університет, 2013

ISSN 2225-7551

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

VISNYK

CHERNIHIV STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

SERIES "TECHNICAL SCIENCES"

SET OF SCIENTIFIC WORKS

ISSUE № 2 (65)

Chernihiv 2013

UDK 62/69+004
BBK 30/35

Published by the decision of the Academic Council of the University (protocol № 6 from 01.07.2013) Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences" is included in the new list of academic editions HAC of Ukraine, approved by the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of Ukraine from 01.07.2010 № 1-05/5. Bulletin of HAC of Ukraine № 7, 2010.

Since 2013, Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences" was included in the international scientometric database eLIBRARY.RU (license agreement number 246-04\2013 on April 29, 2013).

Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences": scientific collection / Chernihiv State Technological University. – Chernihiv : Chernihiv State Technological University, 2013. – № 2 (65). – 255 p.

This issue of Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences" contains the articles on theoretical and experimental research in the field of Engineering science: mechanics, mechanochemistry, integrated technologies of machinery and motor transport, welding technology, information and computer technologies, energetic, environmental conservation and light and food technologies. The articles are written by the scientists, postgraduates, masters students, students and reviewed by the higher technical educational establishments and the institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine (NAS).

Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences" will be useful for the scientists in different fields of technical sciences, scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of the higher technical educational establishment.

UDK 62/69+004
BBK 30/35

Editor – in – chief:
Kazymyr V.V., Vice-rector of scientific work, Doctor of Technical Sciences, Professor.
Deputy Editor in - chief:
Pylypenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor.
Members of the Editorial Board:
Bolotov G.P., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Denisov Y.A., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Dubenets V.G., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Dudla I.A., Doctor of Technical Sciences, associate professor;
Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Lytvynov V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Senko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Skorobohatova V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Kharchenko G.K., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Cherednichenko P.I., Doctor of Technical Sciences, Professor;
John N. Davies, Professor, Department of Computer Science, Glyndwr University, Wrexham, U.K.

Founded in 1996. Certificate of State repistration KV № 14994-3966 PR from 27.02.2009.

ISSN 2225-7551

© Composite author, 2013
© Chernihiv State Technological University, 2013

ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

Пилипенко О.І., Полуян А.В. Комплексне оцінювання аналізу руху ролика ланцюга за допомогою програмного продукту SOLIDWORKS....9

Алексеевский Д.Г. Анализ эффективности моментного управления электромеханической системой ВЭУ....17

Бойко С.В. Автоматизація підготовки виробництва корпусних деталей методом зворотного інжинірингу....24

Кондель В.М., Шевчук М.М., Холодков Р.Т. Дослідження раціональних перерізів стиснутих елементів конструкцій та деталей машин....29

Булах І.О., Глоба О.В. Аналіз методів неруйнуючої дефектоскопії виробів з композиційних матеріалів....36

РОЗДІЛ ІІ. МЕХАНОХІМІЯ

Приступа А.Л. Особливості розрахунку часткових ємностей для моделювання теслівських процесів при бездротовій передачі енергії....43

Анісімов В.В., Єрмаков П.П. Дослідження процесу кавітації в зануреному соплі....47

Радич Ю.В., Шилович Т.Б., Лазарєв Т.В. Експериментальні дослідження фізико-хімічних процесів при піролізі торфу....54

Dubenets V.H., Savchenko O.V. Optimization of multilayered electro-viscoelastic plates....59

РОЗДІЛ ІІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

Федориненко Д.Ю. Якість системи керування положенням шпинделя з гідростатичними опорами регульованого типу....69

Рудик А.В., Венжега В.І., Рудик В.А. Експериментальні дослідження точності формоутворення торців....76

Чуприна В.М. Динамічні розрахунки верстатів та їх вузлів за методом кінцевих елементів у САПР....81

Макатьора Д.А. Визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми ножем із двосторонньою заточкою....92

РОЗДІЛ ІV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

Болотов Г.П., Бондаренко І.С. Прецизійне дифузійне паяння алюмінієвих сплавів....98

Березін Л.Я. Обладнання для проведення процесу зварювання в зовнішіх електричних полях високої напруги....102

РОЗДІЛ V. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Казимир В.В. Многоагентное управление электронным пучком в установках электронно-лучевой сварки....112

Литвинов В.В., Богдан И.В., Сливко К.С. Инструментальные средства верификации моделей программного обеспечения....120

Вавіленкова А.І. Програмне забезпечення для виявлення текстових документів, ідентичних за змістом....125

Гумен М.Б. Методи комп'ютерного оброблення зображень та сфери їх раціонального застосування....133

Двоєглазова М.В., Скітер І.С. Розроблення архітектури системи підтримки прийняття рішень для аналізу інтеграції інформаційних систем 137

Риндич Є.В. Архітектура захищеної системи голосового конференц-зв'язку в IP-мережах 142

Семко В.В. Логіко-математична модель опису простору рішень 147

Ярмілко А.В. Використання методів візуалізації у діагностиці та управлінні електронно-променевим мікрообробленням оптичних матеріалів 156

Кряжич О.О., Захматов В.Д. Підхід до перевірки відповідності моделі управління імпульсними засобами багатопланового захисту 162

РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

Лежнюк П.Д., Кравчук С.В. Оптимізація схем під'єднання нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії в електричних мережах 168

Шкрабец Ф.П., Красовский П.Ю. Анализ влияния параметров воздушных ЛЭП на технические потери при транспортировке электроэнергии 173

Яндульський О.С., Мацейко В.В. Підвищення якості роботи енергосистем засобами систем гнучких передач змінного струму 178

Баженов В.А., Сулейманов В.М., Кацадзе Т.Л. Формування проектних рішень розвитку електроенергетичних систем 183

Зайцев С.В., Приступа В.В., Василенко В.М. Оцінювання завадозахищеності безпровідних мереж із сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот. 192

Заровський Р.В. Оптимізація за швидкодією системи стабілізації напруги з широтно-імпульсною модуляцією першого роду 202

Марченко А.А., Труніна Г.О., Тимохіна А.О. Модель регулятора напруги розподільної електричної мережі 209

Собуцький В.О., Бура В.С. Методика математичного моделювання виробничо-промислової ситуації в системі магістральних електромереж як елементу міської інфраструктури 215

Шевченко С.Ю., Довгалюк О.М., Піротті О.Є. Особливості вибору обмежувачів перенапруги в мережах 6-35 кВ 224

Жиленков А.А., Чёрный С.Г. Адаптивная система управления активного фильтра с модульной топологией 230

РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ І ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Іванишин В. А., Шпилька С. М. Результати інженерно-геологічних вишукувань під будівництво житлового будинку з підземним паркінгом: польові і лабораторні вишукування ... 236

Гуменюк О.Л., Шупило К.О., Семенюк О.Ю., Зінченко Ю.С. Використання барвників вітчизняними виробниками харчової продукції 244

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО "ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ. СЕРІЯ "ТЕХНІЧНІ НАУКИ" 249

CONTENTS

SECTION I. MECHANICS

Pylypenko O.I., Poluyan A.V. Comprehensive assessment of the analysis of motion roller chain using software product SOLIDWORKS....9

Aleksiievskyi D.H. Analysis of torque control effectiveness for WPP electromechanical system....17

Boyko S.V. Automation of preparation of manufacture of case details by a method of reverse engineering....24

Kondel V.M., Shevchuk M.M., Kholodkov R.T. The investigation of rational sections for compressed structures and parts of machines....29

Bulakh I.O., Hloba O.V. The analysis of methods of non-destructive flaw detection of the products from composite materials....36

SECTION II. MECHANOCHEMISTRY

Prystupa A.L. Features of calculating the partial capacitances for simulation of tesla's processes at wireless power transmission....43

Anisimov V.V., Yermakov P.P. Investigation of cavitation process in submerged nozzle....47

Radych Y.V., Shylovych T.B., Lazariev T.V. Experimental investigations of physical and chemical processes by pyrolysis of peat....54

Dubenets V.H., Savchenko O.V. Optimization of multilayered electro-viscoelastic plates....59

SECTION III. INTEGRATED TECHNOLOGIES OF MACHINEBUILDING AND MOTOR TRANSPORT

Fedorynenko D.Y. Quality of management system of spindle position with hydrostatical supports of adjustable type....69

Rudyk A.V., Venzheha V.I., Rudyk V.A. The experimental investigation of the accuracy of the ends butt forming....76

Chupryna V.M. The dynamic calculations of tools and their parts by final element method in CAD..81

Makatyora D.A. Determination of linear cutting force of microporous rubber with a knife with double-sided sharpening....92

SECTION IV. WELDING TECHNOLOGY

Bolotov H.P., Bondarenko I.S. Precision diffusion solder of aluminum alloys....98

Berezin L.Y. Equipment for the welding process in the external electric fields of high voltage....102

SECTION V. INFORMATION COMPUTER TECHNOLOGIES

Kazymyr V.V. Multi-agent control of the electron beam in the electron beam welding machines....112

Lytvynov V.V., Bohdan I.V., Slivko K.S. Software models of tools verification....120

Vavilenkova A.I. Software for detection of text documents identical in content....125

Humen M.B. Methods of computer processing of images and area of their rational use....133

Dvoiehlazova M.V., Skiter I.S. Development of architecture of system of support of making decisions for the analysis of integration of informative systems....137

Ryndych Y.V. Architecture of secured voice conference systems in IP-networks....142

Semko V.V. Logical-mathematical model of the description of decisions space....147

Yarmilko A.V. Applying the imaging techniques for diagnostics and controlling of electron-radial stream micromachining of the optical materials....156

Kriazhych O.O., Zakhmatov V.D. The approach to the check of the conformity of management model by impulse means of multiplane protection.....162

SECTION VI. POWER ENGINEERING

Lezhniuk P.D., Kravchuk S.V. Optimization of connection of non-traditional renewable energy in electric networks.....168

Shkrabets F.P., Krasovskiy P.Y. Analysis of overhead lines parameters influence on technical power losses in transit 173

Yandulskyi O.S., Matseiko V.V. Improving the quality of power systems by means of flexible AC transmission systems.....178

Bazhenov V.A., Suleimanov T.M., Katsadze T.L. Formation of design solutions for electric power systems 183

Zaitsev S.V., Prystupa V.V., Vasylenko V.M. Interference evaluation of stability of wireless networks with OFDM signals with internal bit pseudo-random permutations of sub-carriers 192

Zarovskyi R.V. Optimization of voltage regulation system with PWM for speed (high-speed operation) 202

Marchenko A.A., Trunina H.O., Tymokhina A.O. Model of voltage regulator of electrical distribution network 209

Sobutskyi V.O., Bura V.S. Methods of mathematical modeling of production-industrial situation in the system of main electric networks as an element of city infrastructure 215

Shevchenko S.Y., Dovgalyuk O.N., Pirotti A.Ye. Peculiarities the choice of surge arresters in networks 6-35 kV.....224

Zhylenkov A.A., Chiornyi S.H. Adaptive control system of active filter with modular topology 230

SECTION VII. TECHNOLOGIES OF LIGHT AND FOOD INDUSTRY AND CONSERVATION OF ENVIRONMENT

Ivanyshyn V.A., Shpylka S.M. Results of geological and engineering surveys for apartment and underground parking building: field and laboratory surveys.....236

Humeniuk O.L., Shupylo K.O., Semeniuk O.Y., Zinchenko Y.S. Use of food coloring by the domestic producers of a food's industry 244

BASIC REQUIREMENTS FOR SUBMITTING MANUSCRIPTS AND SCIENTIFIC ARTICLES 249

РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

УДК 621.855.001.24

О.І. Пилипенко, д-р техн. наук
А.В. Полуян, аспірант
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ АНАЛІЗУ РУХУ РОЛИКА ЛАНЦЮГА ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ SOLIDWORKS

О.И. Пилипенко, д-р техн. наук
А.В. Полуян, аспирант
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ РОЛИКА ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА SOLIDWORKS

O.I. Pylypenko, Doctor of Technical Sciences
A.V. Poluyan, graduate student
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE ANALYSIS OF MOTION ROLLER CHAIN USING SOFTWARE PRODUCT SOLIDWORKS

Представлено аналіз руху ролика ланцюга відносно координатних осей за допомогою програмного комплексу САПР – SolidWorks. Виявлено періодичні зміни лінійних та кутових переміщень, швидкостей та прискорень ролика ланцюгового контуру під час усталеного руху ланцюгової передачі. Розглянуто різку зміну кута набігання ролика на ведену зірочку в момент пуску та гальмування ланцюгової передачі.

Ключові слова: *ланцюгова передача, аналіз, ролик.*

Представлен анализ движения ролика цепи относительно координатных осей с помощью программного комплекса САПР – SolidWorks. Выявлены периодические изменения линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений ролика цепного контура при установившемся движении цепной передачи. Рассмотрено резкое изменение угла набегания ролика на ведомую звездочку в момент пуска и торможения цепной передачи.

Ключевые слова: *цепная передача, анализ, ролик.*

The analysis of the motion of a roller chain relative to the coordinate axes by means of software CAD – SolidWorks is presented. Periodic changes in linear and angular displacements, velocities and accelerations of roller chain contour during steady motion of the chain transmission are detected. There is a sharp change of angle foray roller on driven sprocket at the time of starting and braking chain transmission.

Key words: *chain drive, analysis, roller.*

Постановка проблеми. На сьогодні більшість машин потребує вдосконалення й оптимізації їх передач, зокрема ланцюгових, з метою зниження матеріаломісткості та енерговитрат. Ланцюгова передача являє собою систему, яка складається з великої кількості взаємодіючих елементів. Одним з основних напрямків досягнення цієї мети є використання сучасних CAD програм [1; 2; 3], які використовують комплексний підхід до розв'язування складних задач, що пов'язані зі структурно-параметричним аналізом та оптимізацією.

До появи CAD програм існували складності графічного проектування 3D-моделі ланцюгової передачі. Головною причиною використання CAD програм є здатність проведення комп'ютерного експерименту з реально відтвореними умовами роботи машини, механізму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання кінематики ланцюгової передачі розглядались у роботах [4; 5], в яких дослідження кінематики передачі проводились без врахування наявності веденої вітки ланцюгового контуру.

У [6] було викладено подальший розвиток теорії та систематизовані наукові основи синтезу ланцюгових передач, які розглядалися як коливальна система. Робота ланцюгової передачі у вищенаведеній літературі описана диференціальними рівняннями крутильних коливань, при розв'язанні яких чисельним методом на ЕОМ отримують власні частоти та форми коливань ланцюгової передачі з практично будь-якою кількістю мас.

Більш точний та досконалий математичний апарат розв'язання диференціальних рівнянь використовується програмним продуктом SolidWorks, оскільки він враховує демпфірування деталей, маси віток ланцюгового контуру, їх інерційність.

Аналіз переміщень, швидкостей та прискорень ролика ланцюгової передачі відносно координатних осей за допомогою програмного комплексу SolidWorks, наскільки нам відомо, раніше не проводився.

Мета статті. Побудувати 3D-модель ланцюгової передачі та проаналізувати рух ролика ланцюга відносно координатних осей.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо процедуру аналізу продуктом SolidWorks рівнянь руху лінійної системи з n ступенями вільності, яка приведена в рух силою, що змінюється з часом t [7]:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{f(t)\}, \quad (1)$$

де $[M]=n\times n$ – симетрична матриця інерції;

$[C]=n\times n$ – симетрична матриця демпфірування;

$[K]=n\times n$ – симетрична матриця жорсткості;

$\{f(t)\}=n$ – розмірний вектор сили;

$\{u\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\ddot{u}\}$ – n-розмірні вектори переміщення, швидкості і прискорення відповідно.

Рівняння (1) є системою n звичайних сумісних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. Рівняння руху пов'язані через параметри мас, жорсткостей і демпфірування. Зв'язок залежить від системи координат, яка використовується для опису рівнянь руху.

Основною ідеєю дослідження методів розташування за власними формами коливань (модальний аналіз) є перетворення системи (1) в ряд незалежних рівнянь, використовуючи модальну матрицю $[\Phi]$ як матрицю перетворення. Вона має нормальні моди $\{f\}_i$ для $i = 1,\ldots, n$, які розташовані таким чином:

$$[\Phi]=[\{\varphi\}_1\ \{\varphi\}_2\ \ldots\{\varphi\}_n]. \quad (2)$$

Нормальні моди і власні значення системи отримуємо з розв'язку задачі:

$$[K][\Phi]=[M][\Phi][\omega^2], \quad (3)$$

де $[\omega^2]$ – діагональна матриця квадратів власних частот.

Система n рівнянь руху для лінійних систем може розділятись на n рівнянь з одним ступенем вільності в обчисленні модального вектора переміщення $\{x\}$:

$$\{u\}=[\Phi]\{x\}. \quad (4)$$

Підставивши вектор $\{u\}$ з рівняння (4) в рівняння (1) та помноживши його на транспоновану модальну матрицю $[\Phi]^T$, знайдемо:

$$[\Phi]^T[M][\Phi]\{\ddot{x}\}+[\Phi]^T[C][\Phi]\{\dot{x}\}+[\Phi]^T[K][\Phi]\{x\}=[\Phi]^T\{f(t)\}. \quad (5)$$

Нормальні моди задовольняють властивість ортогональності, а модальна матриця $[\Phi]$ є нормальною для того, щоб задовольняти такі рівняння:

$$[\Phi]^T[M][\Phi]=[1], \quad (6)$$

$$[\Phi]^T[C][\Phi]=2[\xi][\omega]. \quad (7)$$

$$[\Phi]^T[K][\Phi]=[\omega^2]. \quad (8)$$

Виконавши підстановки рівнянь (6-8), рівняння (5) перетворюється на систему з n незалежних диференціальних рівнянь другого порядку (SDOF) для $i = 1,\ldots, n$:

$$\ddot{x}_i+2\xi\cdot\omega\cdot\dot{x}_i+\omega^2x_i=\{\varphi\}_i^T\{f(t)\}. \quad (9)$$

Рівняння (9) розв'язується з використанням покрокових методів інтегрування, подібних до Wilson-Theta та Newmark. Інтегрування виконується в часовому просторі, де використовуються результати останнього кроку розташування ролика ланцюга для прогнозування наступного кроку.

Побудуємо 3D-модель ланцюгової передачі за такими параметрами: кількість зубців ведучої зірочки (z_1 = 23); кількість зубців веденої зірочки (z_2 = 43); профіль зубця "зі зміщенням"; клас точності зірочки "А"; ланцюг ПР-15,875-2300-1; попередня міжосьова відстань 555 мм; кут нахилу лінії центрів "0" (рис. 1).

Під час 3D-проектування використаємо параметри та якісні характеристики зірочок ланцюгової передачі згідно з ГОСТ 591-69; ланцюг – згідно з ГОСТ 13568-97, що відповідає ISO 606-94.

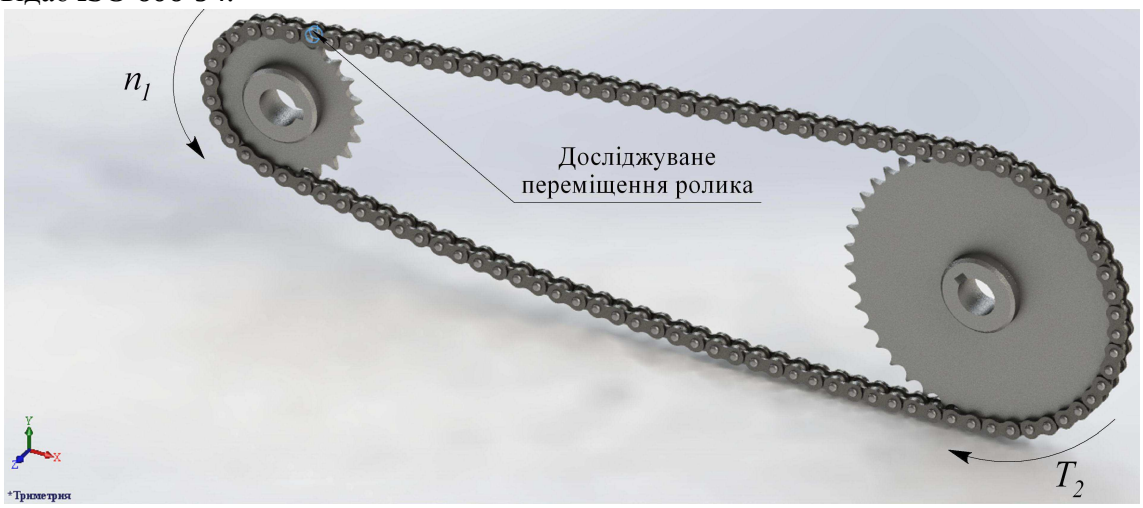


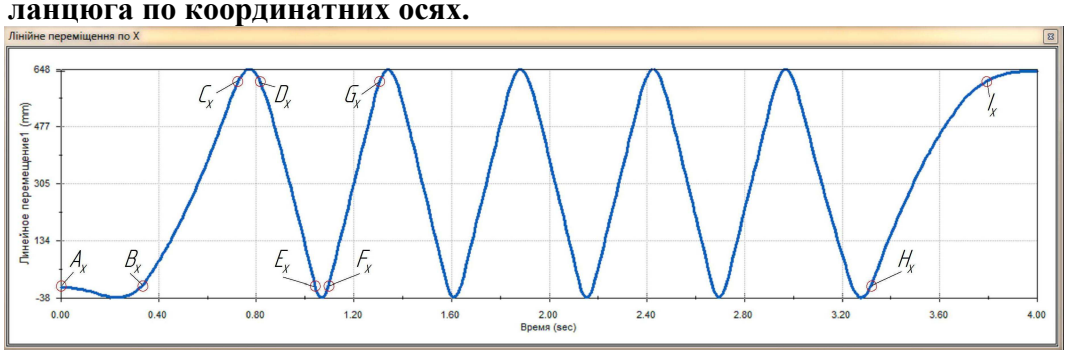
Рис. 1. 3D-модель ланцюгової передачі

Задамо швидкість обертання проти годинникової стрілки ведучої зірочки (n_1 = *500 хв*$^{-1}$) та момент опору веденої зірочки (T_2 = *114,94 Н·м*). Вкажемо проміжок часу (0-4 секунд), протягом якого відбуватиметься розрахунок. Зауважимо, що сила земного тяжіння (g = 9,80665 м/с^2) направлена в напрямку, протилежному осі *Y*. Запустимо розрахунок та охарактеризуємо час аналізу руху всього 3D-механізму. Починаючи від 0 до 1 секунди, ведуча зірочка ланцюгової передачі поступово починає набирати оберти (0-500 *хв*$^{-1}$), далі, від 1 до 3 секунд, – встановлюється робочий режим, а від 3 до 4 секунд ведуча зірочка поступово зменшує оберти (500-0 *хв*$^{-1}$).

Після закінчення розрахунку виберемо довільний ролик ланцюга (рис. 1) та побудуємо графіки переміщень, швидкостей та прискорень відносно координатних осей (рис. 2-7).

Зауважимо, що програмний комплекс SolidWorks дає можливість визначити положення відносно глобальної системи координат будь-якої деталі у складальній одиниці на відповідному проміжку часу.

1. Аналіз кривих зміни лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по координатних осях.



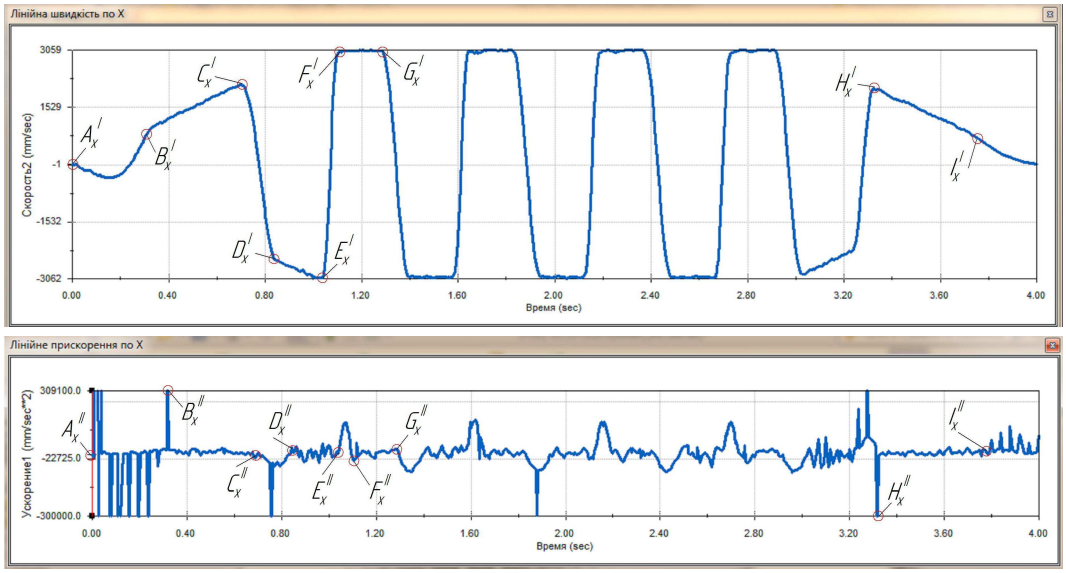


Рис. 2. Лінійні переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі X

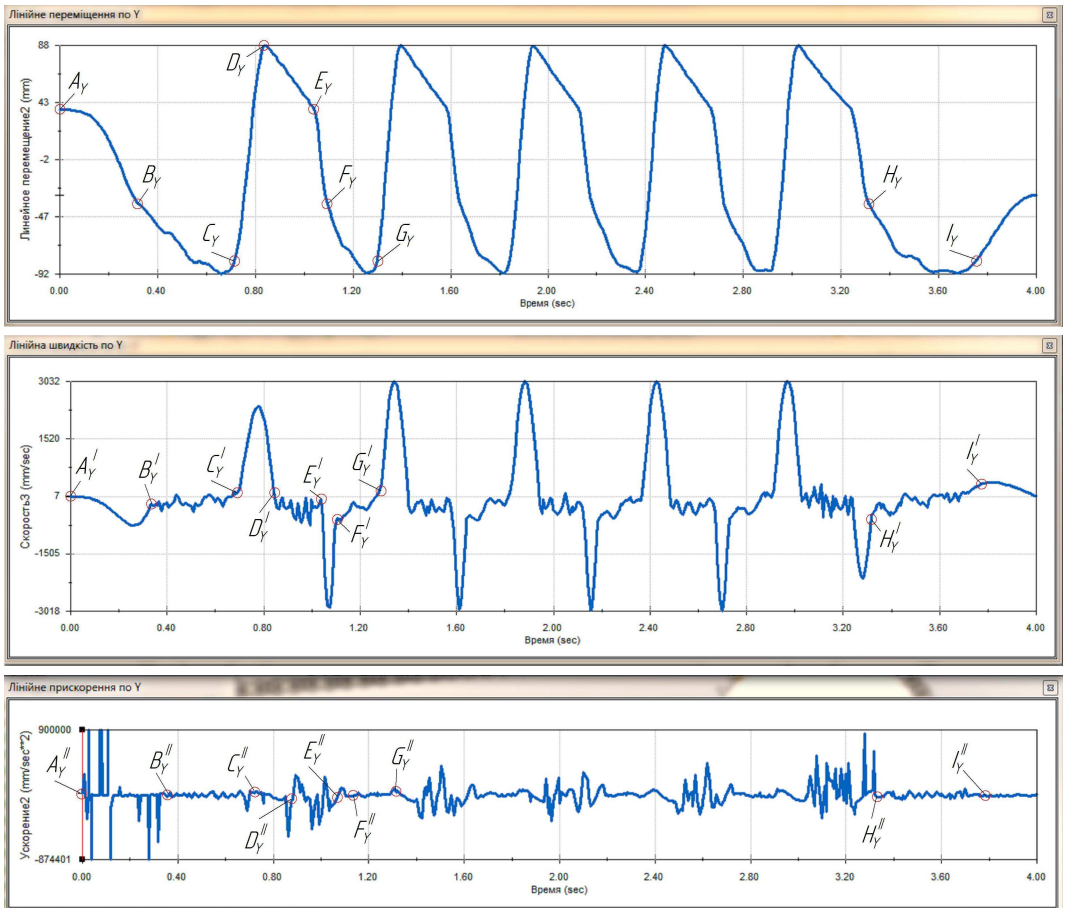


Рис. 3. Лінійні переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Y

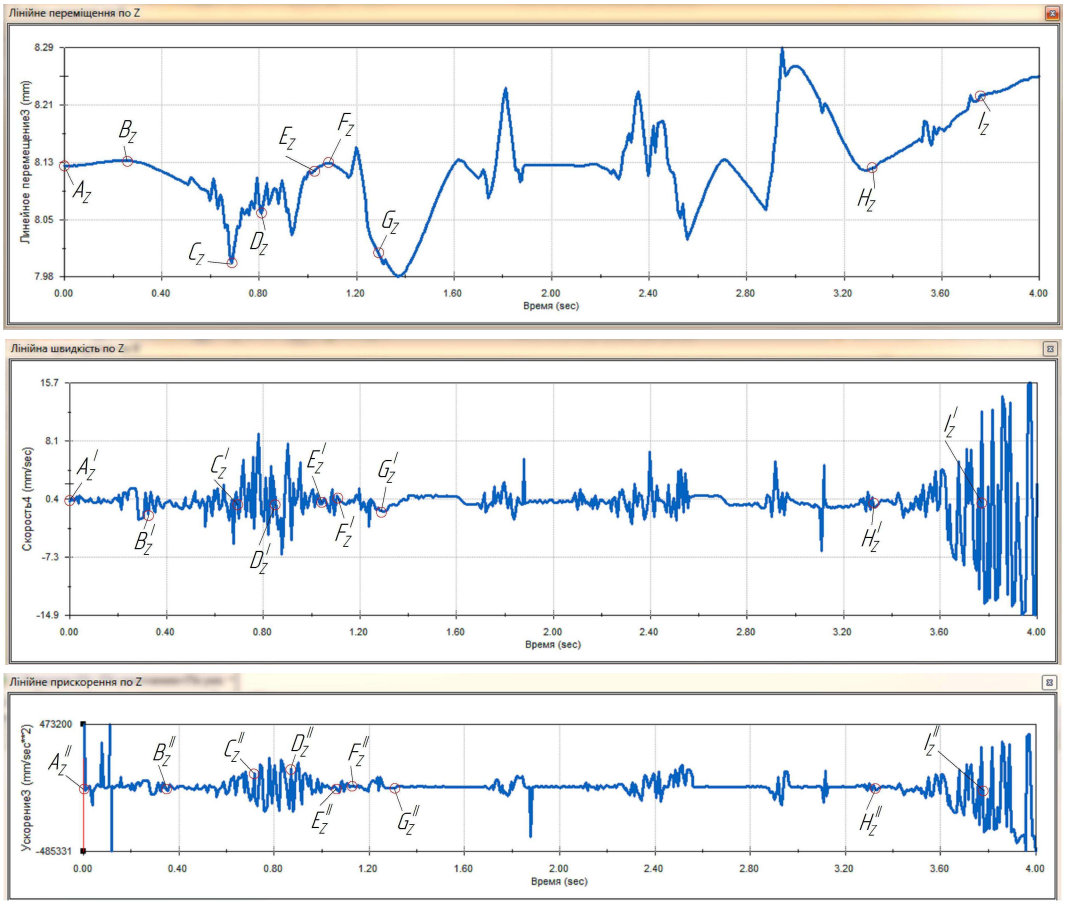


Рис. 4. Лінійні переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z

На графіках (рис. 2-4) позначені точки, які ділять криву кожного з графіків на відрізки, що характеризують розташування ролика ланцюга.

У точках A_X, E_X, A'_X, E'_X, A''_X, E''_X, A_Y, E_Y, A'_Y, E'_Y, A''_Y, E''_Y, A_Z, E_Z, A'_Z, E'_Z, A''_Z, E''_Z ролик входить у зачеплення з ведучою зірочкою, а на відрізках A_XB_X, E_XF_X, $A'_XB'_X$, $E'_XF'_X$, $A''_XB''_X$, $E''_XF''_X$, A_YB_Y, E_YF_Y, $A'_YB'_Y$, $E'_YF'_Y$, $A''_YB''_Y$, $E''_YF''_Y$, A_ZB_Z, E_ZF_Z, $A'_ZB'_Z$, $E'_ZF'_Z$, $A''_ZB''_Z$, $E''_ZF''_Z$ він контактує з нею, і в точках B_X, F_X, H_X, B'_X, F'_X, H'_X, B''_X, F''_X, H''_X, B_Y, F_Y, H_Y, B'_Y, F'_Y, H'_Y, B''_Y, F''_Y, H''_Y, B_Z, F_Z, H_Z, B'_Z, F'_Z, H'_Z, B''_Z, F''_Z, H''_Z виходить з контакту.

На відрізках B_XC_X, F_XG_X, H_XI_X, $B'_XC'_X$, $F'_XG'_X$, $H'_XI'_X$, $B''_XC''_X$, $F''_XG''_X$, $H''_XI''_X$, B_YC_Y, F_YG_Y, H_YI_Y, $B'_YC'_Y$, $F'_YG'_Y$, $H'_YI'_Y$, $B''_YC''_Y$, $F''_YG''_Y$, $H''_YI''_Y$, B_ZC_Z, F_ZG_Z, H_ZI_Z, $B'_ZC'_Z$, $F'_ZG'_Z$, $H'_ZI'_Z$, $B''_ZC''_Z$, $F''_ZG''_Z$, $H''_ZI''_Z$ ролик ланцюга переміщується по веденій вітці ланцюга, а в точках C_X, G_X, I_X, C'_X, G'_X, I'_X, C''_X, G''_X, I''_X, C_Y, G_Y, I_Y, C'_Y, G'_Y, I'_Y, C''_Y, G''_Y, I''_Y, C_Z, G_Z, I_Z, C'_Z, G'_Z, I'_Z, C''_Z, G''_Z, I''_Z з веденої вітки ланцюгового контуру входить у зачеплення з веденою зірочкою.

На відрізках C_XD_X, $C'_XD'_X$, $C''_XD''_X$, C_YD_Y, $C'_YD'_Y$, $C''_YD''_Y$, C_ZD_Z, $C'_ZD'_Z$, $C''_ZD''_Z$ ролик ланцюга контактує з веденою зірочкою, а в точках D_X, D'_X, D''_X, D_Y, D'_Y, D''_Y, D_Z, D'_Z, D''_Z він виходить з контакту з веденою зірочкою.

На відрізках D_XE_X, $D'_XE'_X$, $D''_XE''_X$, D_YE_Y, $D'_YE'_Y$, $D''_YE''_Y$, D_ZE_Z, $D'_ZE'_Z$, $D''_ZE''_Z$ ролик ланцюга переміщується по ведучій вітці ланцюга.

Криві графіків зміни лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осях X та Y змінюються періодично при усталеному русі ланцюгової передачі (рис. 2, 3). Спостерігається також періодичність зміни кривих при усталеному русі лінійної швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z (рис. 4).

З графіка лінійного переміщення ролика по осі X видно, що довжини дуг C_XD_X, E_XF_X відповідають діаметрам ведучої та веденої зірочок на шкалі часу, тобто по шкалі часу можна

судити про місцезнаходження шарніра ланцюга на ведучій та веденій зірочках. При цьому всі верхні піки кривих відповідають періодичному розташуванню ролика на веденій зірочці, а всі нижні піки – періодичному розташуванню ролика на ведучій зірочці.

На графіку лінійної швидкості ролика по осі X видно, що, проходячи по вітках ланцюгового контуру (відрізки $D'_X E'_X$ та $F'_X G'_X$), ролик ланцюга здійснює поздовжні коливання.

З графіка лінійного прискорення ролика по осі X видно, що максимальні нижні піки відповідають прискоренням ролика на ведучій зірочці, а верхні – на веденій.

На графіку лінійного переміщення ролика по осі Y видно, що довжини кривих $C_Y D_Y$, $E_Y F_Y$ є підтвердженням того, що діаметри ведучої та веденої зірочок різні. При цьому всі верхні піки кривої відповідають періодичному виходу з контакту ролика з веденою зірочкою (точка D_Y), а всі нижні піки (точка C_Y) – періодичному входженню в контакт з веденою зірочкою.

З графіка лінійної швидкості ролика по осі Y прослідковується чітко виражена періодичність коливань ролика ланцюга. Верхні піки кривої графіка відповідають розташуванню ролика ланцюга на веденій зірочці, аналогічно нижні піки – на ведучій зірочці. Амплітуди лінійних коливань ролика більші у ведучій вітці ланцюга в порівнянні з веденою. При цьому менші величини нижніх піків відповідають меншій кількості зубців ведучої зірочки, а більші величини верхніх піків відповідають більшій кількості зубців веденої зірочки.

Графік лінійного прискорення ролика по осі Y підтверджує, що амплітуди лінійних коливань ролика більші у ведучій вітці ланцюга.

Зазначимо, що програмний комплекс SolidWorks має у своєму складі розрахунок випадкових коливань. Власне графіки лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z і є відображенням цих розрахунків.

З графіка лінійного переміщення ролика по осі Z складно щось стверджувати.

Проаналізуємо більш конкретно графіки лінійної швидкості та прискорення ролика ланцюга по осі Z. На графіках швидкості та прискорення ролика (рис. 4) криві показують, що найбільше переміщення ролика виникає при контакті з веденою зірочкою в момент пуску та гальмування ланцюгової передачі.

2. Аналіз кривих зміни кутового переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по координатних осях.

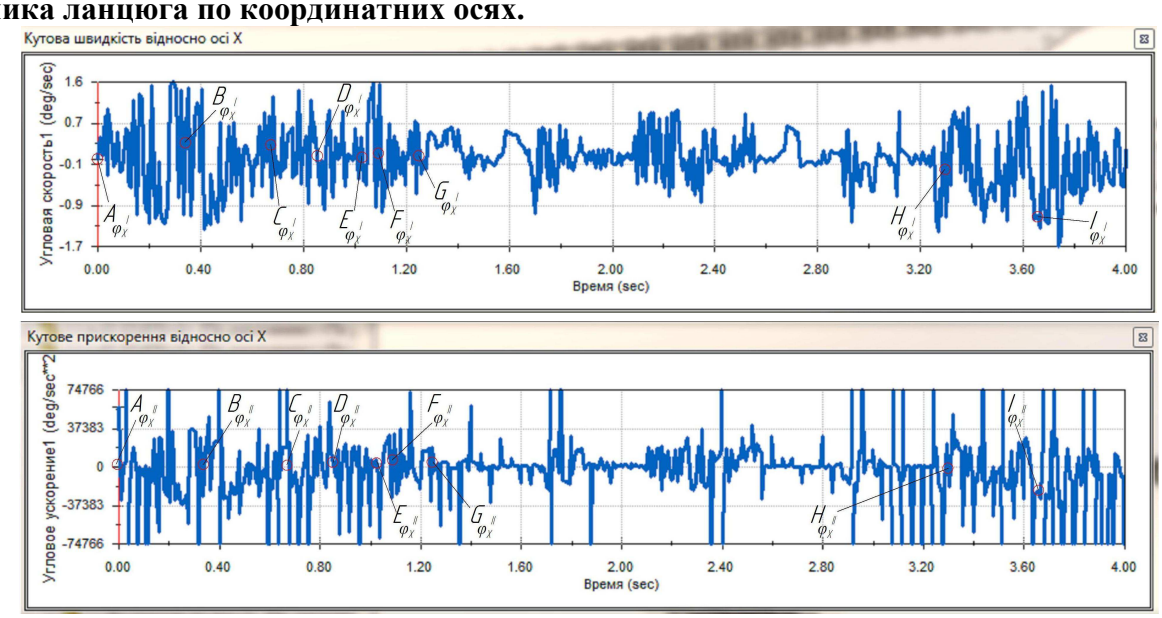


Рис. 5. Кутова швидкість та прискорення ролика ланцюга відносно осі X

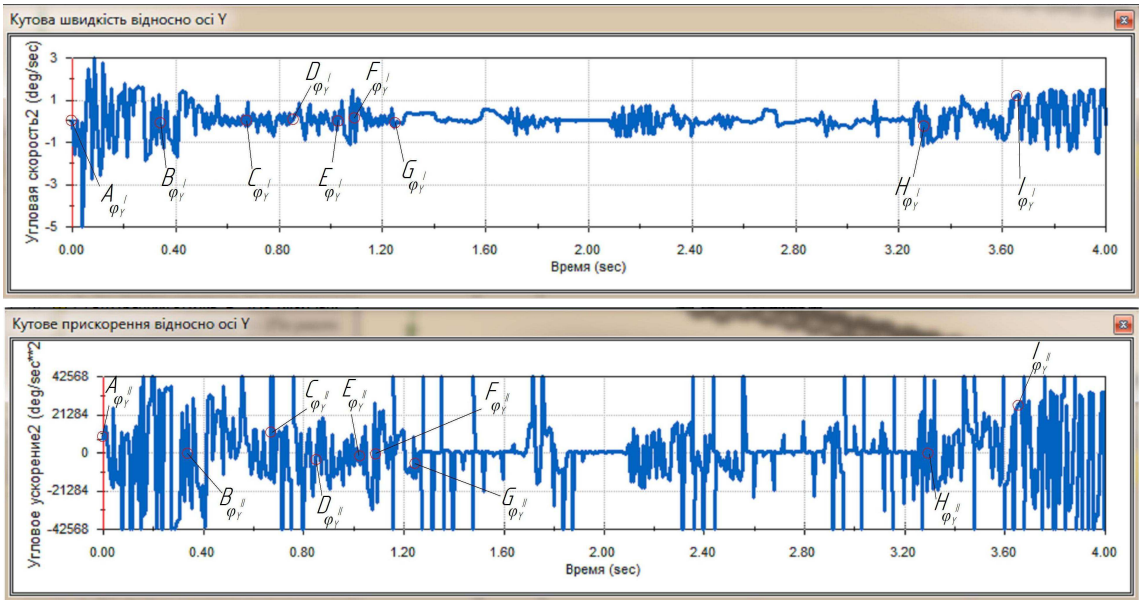


Рис. 6. Кутова швидкість та прискорення ролика ланцюга відносно осі Y

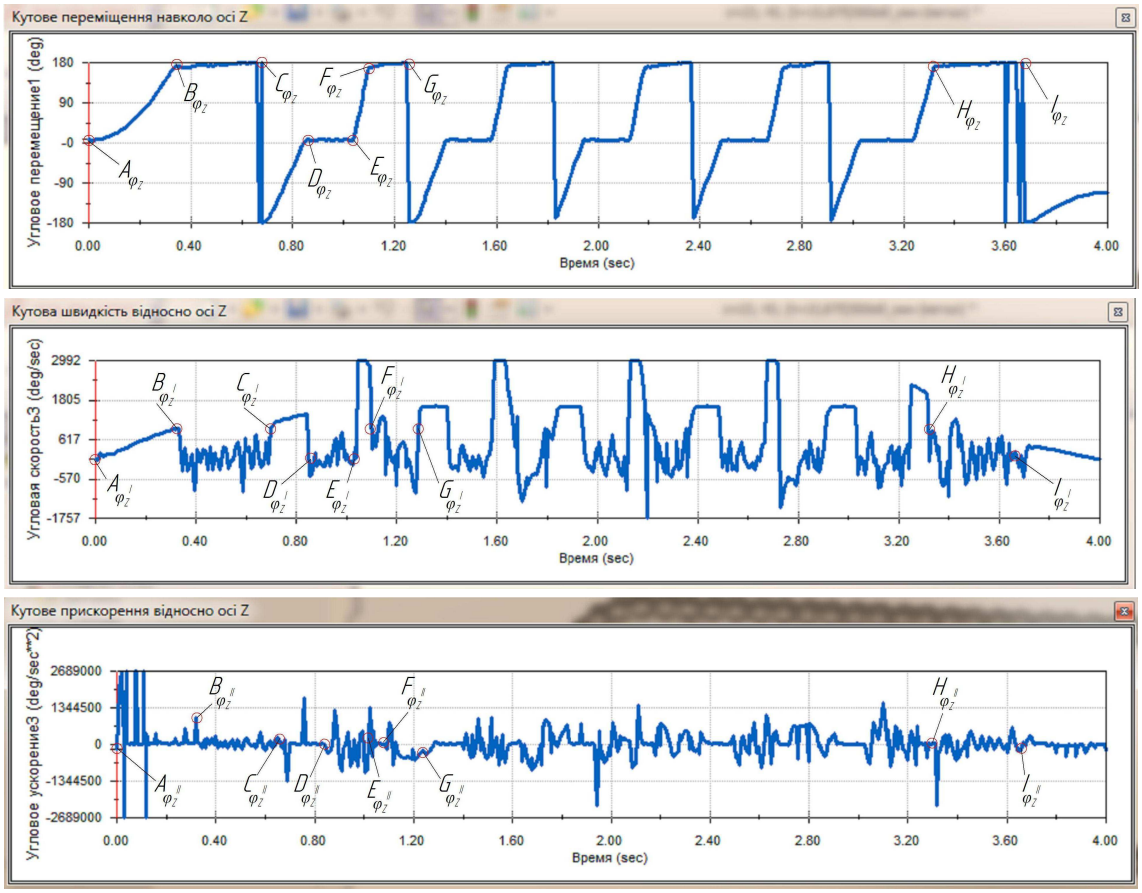


Рис. 7. Кутове переміщення, швидкість та прискорення ролика ланцюга відносно осі Z

На жаль, побудову графіків кутових переміщень відносно осей *X* та *Y* програмний комплекс SolidWorks не виконує, але виконує побудову їх швидкостей та прискорень.

На графіках (рис. 5-7) позначені точки, які ділять криву кожного з графіків на відрізки, що характеризують розташування ролика ланцюга.

У точках $A\varphi_Z$, $E\varphi_Z$, $A\varphi'_Y$, $E\varphi'_Y$, $A\varphi''_Y$, $E\varphi''_Y$, $A\varphi'_Z$, $E\varphi'_Z$, $A\varphi''_Z$, $E\varphi''_Z$ ролик входить у зачеплення з ведучою зірочкою, а на відрізках $A\varphi_Z B\varphi_Z$, $E\varphi_Z F\varphi_Z$, $A\varphi'_X B\varphi'_X$, $E\varphi'_X F\varphi'_X$, $A\varphi''_X B\varphi''_X$,

$E\varphi''_X F\varphi''_X$, $A\varphi'_Y B\varphi'_Y$, $E\varphi'_Y F\varphi'_Y$, $A\varphi''_Y B\varphi''_Y$, $E\varphi''_Y F\varphi''_Y$, $A\varphi'_Z B\varphi'_Z$, $E\varphi'_Z F\varphi'_Z$, $A\varphi''_Z B\varphi''_Z$, $E\varphi''_Z F\varphi''_Z$ контактує з нею.

У точках $B\varphi_Z$, $F\varphi_Z$, $B\varphi'_X$, $F\varphi'_X$, $B\varphi''_X$, $F\varphi''_X$, $B\varphi'_Y$, $F\varphi'_Y$, $B\varphi''_Y$, $F\varphi''_Y$, $B\varphi'_Z$, $F\varphi'_Z$, $B\varphi''_Z$, $F\varphi''_Z$ ролик виходить з контакту з ведучою зірочкою, на відрізках $B\varphi_Z C\varphi_Z$, $F\varphi_Z G\varphi_Z$, $H\varphi_Z I\varphi_Z$, $B\varphi'_X C\varphi'_X$, $F\varphi'_X G\varphi'_X$, $H\varphi'_X I\varphi'_X$, $B\varphi''_X C\varphi''_X$, $F\varphi''_X G\varphi''_X$, $H\varphi''_X I\varphi''_X$, $B\varphi'_Y C\varphi'_Y$, $F\varphi'_Y G\varphi'_Y$, $H\varphi'_Y I\varphi'_Y$, $B\varphi''_Y C\varphi''_Y$, $F\varphi''_Y G\varphi''_Y$, $H\varphi''_Y I\varphi''_Y$, $B\varphi'_Z C\varphi'_Z$, $F\varphi'_Z G\varphi'_Z$, $H\varphi'_Z I\varphi'_Z$, $B\varphi''_Z C\varphi''_Z$, $F\varphi''_Z G\varphi''_Z$, $H\varphi''_Z I\varphi''_Z$ переміщується по веденій вітці ланцюга, і в точках $C\varphi_Z$, $G\varphi_Z$, $I\varphi_Z$, $C\varphi'_X$, $G\varphi'_X$, $I\varphi'_X$, $C\varphi''_X$, $G\varphi''_X$, $I\varphi''_X$, $C\varphi'_Y$, $G\varphi'_Y$, $I\varphi'_Y$, $C\varphi''_Y$, $G\varphi''_Y$, $I\varphi''_Y$, $C\varphi'_Z$, $G\varphi'_Z$, $I\varphi'_Z$, $C\varphi''_Z$, $G\varphi''_Z$, $I\varphi''_Z$ ролик з веденої вітки ланцюгового контуру входить у зачеплення з веденою зірочкою.

На відрізках $C\varphi_Z D\varphi_Z$, $C\varphi'_X D\varphi'_X$, $C\varphi''_X D\varphi''_X$, $C\varphi'_Y D\varphi'_Y$, $C\varphi''_Y D\varphi''_Y$, $C\varphi'_Z D\varphi'_Z$, $C\varphi''_Z D\varphi''_Z$ ролик ланцюга контактує з веденою зірочкою, а в точках $D\varphi_Z$, $D\varphi'_X$, $D\varphi''_X$, $D\varphi'_Y$, $D\varphi''_Y$, $D\varphi'_Z$, $D\varphi''_Z$ виходить з контакту з нею.

На відрізках $D\varphi_Z E\varphi_Z$, $D\varphi'_X E\varphi'_X$, $D\varphi''_X E\varphi''_X$, $D\varphi'_Y E\varphi'_Y$, $D\varphi''_Y E\varphi''_Y$, $D\varphi'_Z E\varphi'_Z$, $D\varphi''_Z E\varphi''_Z$ ролик ланцюга переміщується по ведучій вітці ланцюга.

Розглянувши криві графіків кутових швидкостей та прискорень ролика відносно осей X та Y (рис. 5, 6), складно їх аналізувати, оскільки вони не описують чіткої закономірності зміни руху та є випадковими коливаннями відносно вказаних осей.

Аналізуючи графіки кутового переміщення та швидкості ролика відносно осі Z, бачимо, що прослідковується їх періодичність при усталеному русі ланцюгової передачі.

На графіку кутового переміщення ролика відносно осі Z спостерігаються різкі зміни кута набігання ролика на ведену зірочку в моменти пуску та гальмування ланцюгової передачі. Це свідчить про обертання ролика ланцюга навколо власної осі.

Розглядаючи криві графіків кутової швидкості та прискорення ролика відносно осі Z, спостерігаються більші амплітуди коливань ролика ланцюга, коли він переміщується по веденій вітці, в порівнянні з ведучою віткою ланцюга.

Проаналізувавши графіки (рис. 2-7) комплексно, можна стверджувати, що в різні періоди часу під час руху ролик ланцюга поводить себе неоднаково. Коли в механічній системі наступає режим усталеного руху з постійною швидкістю, то починає прослідковуватися характер поводження ролика ланцюга з часом. Він рухається періодично, виникають певні коливання ролика, коли він контактує із зірочками та знаходиться у ведучій та веденій вітках ланцюга.

Зауважимо, що була побудована анімаційна 3D-модель ланцюгової передачі, з якої був зроблений представлений аналіз. На жаль, рис. 1 не повною мірою відображає реальну картину руху ролика ланцюгового контуру.

Висновки. У результаті побудови 3D-моделі ланцюгової передачі та аналізу динаміки руху ролика ланцюга відносно координатних осей за допомогою програмного продукту SolidWorks можна стверджувати, що:

– криві графіків зміни лінійного переміщення, швидкості та прискорення ролика ланцюга по осях X та Y, а також лінійної швидкості та прискорення по осі Z змінюються періодично при усталеному русі ланцюгової передачі;

– проходячи по вітках ланцюгового контуру, ролик ланцюга здійснює поздовжні коливання відповідно по кожній з осей;

– амплітуди лінійних коливань ролика більші у ведучій вітці ланцюга в порівнянні з веденою;

– при кутовому переміщенні ролика відносно осі Z спостерігається різка зміна кута набігання ролика на ведену зірочку в моменти пуску та гальмування ланцюгової передачі, що свідчить про обертання ролика ланцюга навколо власної осі;

– амплітуди кутових коливань ролика менші у ведучій вітці ланцюга в порівнянні з веденою.

Список використаних джерел

1. *Алямовский А. А.* COSMOSWorks. Основы расчёта конструкций на прочность в среде SolidWorks / А. А. Алямовский. – М. : ДМК-Пресс, 2010. – 789 с.
2. *Paul M. Kurowski.* Engineering. Analysis with COSMOSWorks Professional. – Schroff Development Corporation (SDC), 2005. – 248 p.
3. *Кудрявцев Е. М.* КОМПАС-3D V10. Максимально полное руководство : в 3-х томах / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 1184 с.
4. *Воробьев Н. В.* Цепные передачи. Машиностроение / Н. В. Воробьев. – М., 1968. – 252 с.
5. *Rachner H. G.* Stahlgelenkketten und Kettentriebe / H. G. Rachner. – Berlin, 1962. – 221 s.
6. *Пилипенко О. И.* Научные основы и синтез цепных передач : дис. д-ра техн. наук / О. И. Пилипенко. – Х., 1996. – 467 с.
7. *Режим* доступу : http://help.solidworks.com.

УДК 62-83-52:621.311.24

Д.Г. Алексеевский, канд. техн. наук
Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОМЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВЭУ

Д.Г. Алексєєвський, канд. техн. наук
Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МОМЕНТНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ВЕУ

D.G. Alekseevskiy, Candidate of Technical Sciences
Zaporozhe State Engineering Akademy, Zaporozhe, Ukraine

ANALYSIS OF TORQUE CONTROL EFFECTIVENESS FOR WPP ELECTROMECHANICAL SYSTEM

Рассматриваются особенности работы электромеханической системы ВЭУ с постоянным углом установки лопастей при переменном характере ветрового потока. Предложена обобщенная математическая модель на базе системы приведенных параметров как инструмент исследования эффективности алгоритмов управления. Показаны результаты использования данной модели для анализа эффективности известных алгоритмов управления моментом генератора. Обоснована необходимость применения прогноза для построения оптимального управления моментом генератора ВЭУ.

***Ключевые слова**: ветроэнергетическая установка, алгоритм управления, модель.*

Розглянуто особливості роботи електромеханічної системи ВЕУ з постійним кутом встановлення лопатей при змінному характері вітрового потоку. Запропонована узагальнена математична модель на базі системи наведених параметрів як інструмент дослідження ефективності алгоритмів управління. Показані результати використання цієї моделі для аналізу ефективності відомих алгоритмів управління моментом генератора. Обґрунтована необхідність використання прогнозу для оптимального управління моментом генератора ВЕУ.

***Ключові слова:** вітроенергетична установка, алгоритм управління, модель.*

The working features of the electromechanics system, which is Wind Power Generator (WPG) with the constant setting of blades corner and with variable character of wind stream, are discussed. The generalized mathematical model that is based on the system of the reduced parameters is proposed as an instrument for research of management algorithms efficiency. The results of this model using for efficiency analysis of the known generator torque control algorithms are shown. The necessity of prognosis control for creation WPG with optimal torque management is grounded.

***Key words:** wind power generator, the control algorithm, model.*

Постановка проблемы. Электромеханическая система ВЭУ при эксплуатации находится под воздействием ветрового потока, значение скорости которого изменяется во времени. Характер его изменения оказывает существенное влияние на величину суммарной выработки электроэнергии. Это требует разработки совершенных, с точки зрения выработки, алгоритмов управления электромеханической системой ВЭУ не только в статическом, но и в динамическом режиме.

Анализ основных исследований и публикаций. В работе [1] был рассмотрен алгоритм управления электромеханической системой ВЭУ в течение электромеханичес-

кого переходного процесса, вызванного изменением скорости ветрового потока. Разгон электромеханической системы при порыве ветра производился при заданном динамическом моменте. Выбор его величины обусловлен характером изменения величины ветрового потока и инерционностью электромеханической системы ВЭУ.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Открытым вопросом остается разработка алгоритма выбора величины рассмотренного динамического момента, исходя из параметров самой системы генерирования и характера ветрового потока.

Цель статьи. Главной целью этой работы является определение характера влияния изменений ветрового потока на величину выработки ветроэлектрогенерирующей системы при различных значения динамического момента в рамках предложенного в [1] алгоритма управления моментом генератора.

Материал и результаты исследования. В качестве инструмента исследования в данной работе предложена модель обобщенной электромеханической системы ВЭУ, построенной на основе системы базисных величин.

В основе модели обобщенной электромеханической системы ВЭУ лежит следующая система базисных величин:

$\omega^{ном}$ – номинальная скорость вращения ветротурбины;

$M_{ВК}^{ном}$ – номинальный момент ветротурбины;

Z_{opt} – оптимальная быстроходность, соответствующая $C_P = C_P^{\max}$;

$C_P^{\max}$ – максимальное значение коэффициента преобразования энергии ветрового потока;

$V_b^{ном}$ – номинальное значение скорости ветрового потока;

$P_{ВК}^{ном}$ – номинальное значение мощности на валу ветротурбины;

$t_{баз}$ – базисное время системы – это время разгона вращающихся масс электромеханической системы с моментом инерции J из неподвижного состояния до номинальной скорости при действии на систему только номинального момента ветротурбины:

$$t_{баз} = \frac{\omega_{ном} \cdot J}{M_{ВК}^{ном}}. \quad (1)$$

В соответствии с системой базисных величин может быть сформирована система относительных величин:

– относительная скорость вращения ветротурбины:

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega^{ном}}, \quad (2)$$

где ω – фактическая скорость вращения ветротурбины;

– относительный момент ветротурбины:

$$M_{ВК}^* = \frac{M_{ВК}}{M_{ВК}^{ном}}, \quad (3)$$

где $M_{ВК}$ – фактический момент ветротурбины;

– относительная быстроходность ветротурбины:

$$Z^* = \frac{Z}{Z_{opt}}, \quad (4)$$

где Z – фактическая быстроходность ветротурбины;

– относительная быстроходность ветротурбины при холостом ходе:

$$Z_{xx}^{*} = \frac{Z_{xx}}{Z_{opt}}, \quad (5)$$

где Z_{xx} – быстроходность ветротурбины в режиме холостого хода;

– относительное значение коэффициента преобразования энергии ветрового потока:

$$C_P^{*} = \frac{C_P}{C_P^{\max}}, \quad (6)$$

где C_P – фактическое значение коэффициента преобразования энергии ветрового потока;

– относительное значение скорости ветрового потока:

$$V_b^{*} = \frac{V_b}{V_b^{ном}}, \quad (7)$$

где V_b – фактическое значение скорости ветрового потока;

– относительное значение мощности на валу ветроколеса:

$$P_{BK}^{*} = \frac{P_{BK}}{P_{BK}^{ном}}, \quad (8)$$

где P_{BK} – фактическое значение мощности на валу ветроколеса;

– относительное время:

$$t^{*} = \frac{t}{t_{баз}}, \quad (9)$$

где t – фактическое время.

Представление параметров электромеханической системы ВЭУ в относительном базисе позволяет значительно упростить ее анализ. В частности, угловая скорость при которой ветротурбина находится в оптимальном режиме отбора мощности ($C_P = C_P^{\max}$) в относительных единицах, определяется как:

$$\omega_{opt}^{*} = V_b^{*}. \quad (10)$$

Действительно, оптимальная скорость вращения вала ветротурбины соответствует оптимальной быстроходности:

$$\omega_{opt} = \frac{Z_{opt} \cdot V_b}{R_{BK}}. \quad (11)$$

Оптимальная быстроходность может быть определена из номинального режима:

$$Z_{opt} = \frac{\omega_{ном} \cdot R_{BK}}{V_b^{ном}}. \quad (12)$$

После подстановки (12) в (11) и преобразования получаем:

$$\frac{\omega}{\omega^{ном}} = \frac{V_b}{V_b^{ном}}. \quad (13)$$

Таким образом, с учетом формул (2) и (7) подтверждается выражение (10).

Зависимость коэффициента преобразования от быстроходности в относительных единицах $C_P^{*}\left(Z^{*}\right)$ приведена на рисунке 1.

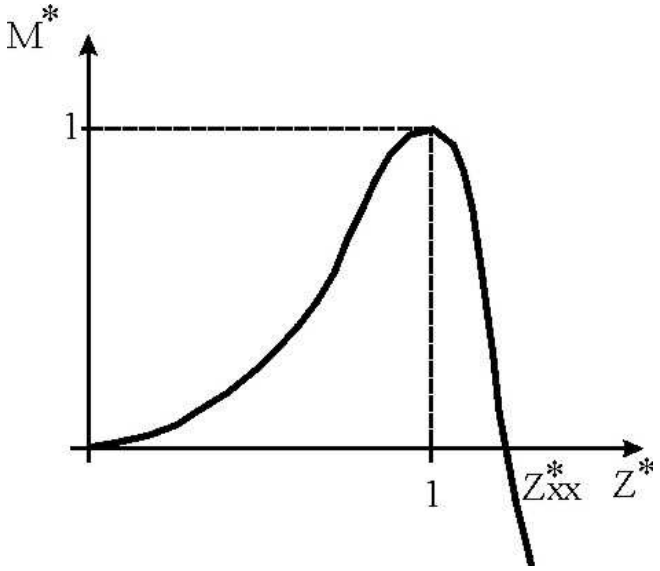


Рис. 1. График зависимости $C_P^*\left(Z^*\right)$

Зависимость $C_P^*\left(Z^*\right)$ может быть представлена в полиномиальном виде:

$$C_P^*\left(Z^*\right)=\sum_{i=1}^{n} a_i \cdot Z^{*i}\ , \tag{14}$$

где a_i $(i=1...n)$ – коэффициенты аппроксимации полинома n-й степени.

В соответствии с (6) максимальная эффективность ветротурбины:

$$C_P^{*\max}=1. \tag{15}$$

В соответствии с выражениями (2), (3) и (8) момент на валу ветротурбины может быть определен через относительные мощность и угловую скорость на валу ветротурбины:

$$M_{BK}^*=\frac{M_{BK}}{M_{BK}^{ном}}=\frac{P_{BK}\cdot\omega^{ном}}{P_{BK}^{ном}\cdot\omega}=\frac{P_{BK}^*}{\omega^*}. \tag{16}$$

В свою очередь, мощность на валу ветротурбины в относительных единицах может быть определена через относительную скорость ветрового потока:

$$P_{BK}^*=\frac{P_{BK}}{P_{BK}^{ном}}=\frac{\rho\cdot S_{BK}\cdot V_b^3\cdot C_P}{2}\cdot\frac{2}{\rho\cdot S_{BK}\cdot V_b^{ном3}\cdot C_P^{\max}}=\frac{V_b^3}{V_b^{ном3}}\cdot\frac{C_P}{C_P^{\max}}=V_b^{*3}\cdot C_P^*, \tag{17}$$

где ρ – плотность воздуха;

S_{BK} – площадь, ометаемая ветроколесом.

Тогда в соответствии с (16) и (17) может быть определена механическая характеристика ветротурбины в относительных единицах:

$$M_{BK}^*=\frac{V_b^{*3}\cdot C_P^*\left(Z^*\right)}{\omega^*}. \tag{18}$$

В соответствии с выражениями (18), (10) и (15) может быть определено значение момента в режиме максимального отбора мощности ветрового потока в относительных единицах:

$$M_{BK_opt}^*=\frac{V_b^{*3}\cdot C_P^*\left(Z^*\right)}{\omega^*}\ \Bigg|_{\substack{C_P^*\left(Z^*\right)=C_P^{*\max}\\ \omega^*=\omega_{opt}^*}}=V_b^{*2}. \tag{19}$$

Быстроходность в относительных единицах может быть выражена через угловую скорость и скорость ветрового потока:

$$Z^* = \frac{\omega^*}{V_b^*}. \quad (20)$$

Уравнение движения электромеханической системы ВЭУ имеет вид:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M_{BK}\left(V_b, \omega\right) - M_G, \quad (21)$$

где M_G – момент генератора.

Обозначим левую часть уравнения (21) как динамический момент, действующий в системе:

$$M_d = J\frac{d\omega}{dt}. \quad (22)$$

Динамический момент, по аналогии с (3), в относительных единицах выразим как отношение фактического динамического момента к номинальному моменту ветротурбины:

$$M_d^* = \frac{M_d}{M_{BK}^{ном}}. \quad (23)$$

Подставим в формулу (22) выражение угловой скорости ω, времени t и динамического момента M_d используя формулы (2), (9) и (23) соответственно. После выноса констант за знак дифференциала и сокращений получим выражение для определения динамического момента системы:

$$M_d^* = \frac{d\omega^*}{dt^*}. \quad (24)$$

Момент генератора, по аналогии с (23), в относительных единицах выразим как отношение фактического момента генератора к номинальному моменту ветротурбины:

$$M_G^* = \frac{M_G}{M_{BK}^{ном}}. \quad (25)$$

Таким образом, на основании (18), (21), (24) и (25) уравнение движения электромеханической системы ВЭУ в относительных единицах примет вид:

$$\frac{d\omega^*}{dt^*} = M_{BK}^*\left(V_b^*, \omega^*\right) - M_G^*. \quad (26)$$

На основе полученных выражений может быть построена математическая модель электромеханической системы ВЭУ в относительном базисе. Укрупненная структурная схема модели приведена на рисунке 2.

Рассмотрим реализацию модели на примере алгоритма, рассмотренного в [1]. В целях наглядности демонстрации результатов примем следующие допущения.

1. Модель не учитывает инерционность формирователя момента.

2. Механические потери в системе включены в описание механической характеристики ветротурбины.

3. В качестве критерия эффективности алгоритма управления принимается относительная энергия на валу генератора W^* на интервале моделирования - T^*:

$$W^* = \int_0^{T^*} M_G^* \cdot \omega^* dt^*. \quad (27)$$

Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

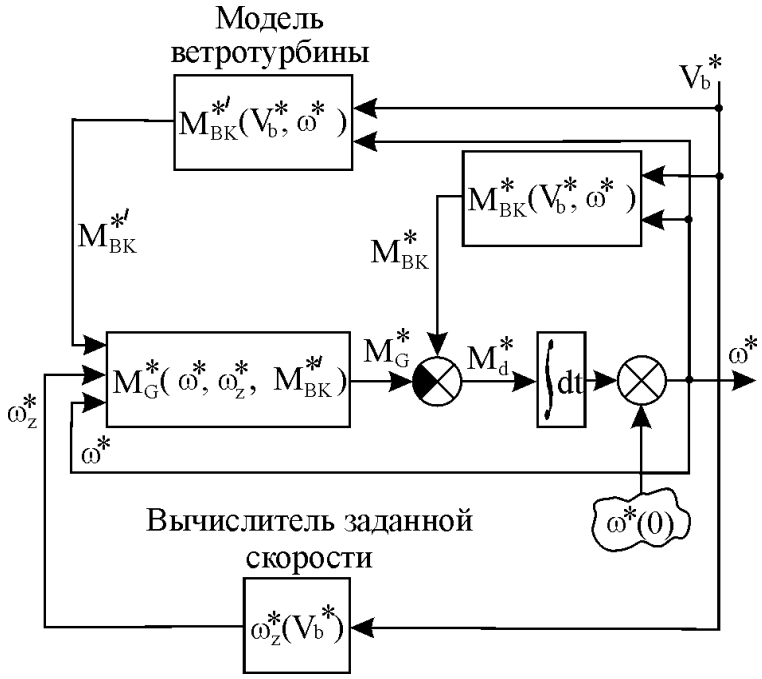


Рис. 2. Структурная схема модели электромеханической системы ВЭУ в относительном базисе

В качестве примера использования обобщенной модели рассмотрено поведение системы на участке разгона, при резком увеличении скорости ветрового потока на 20 % от номинала для четырех вариантов алгоритмов управления.

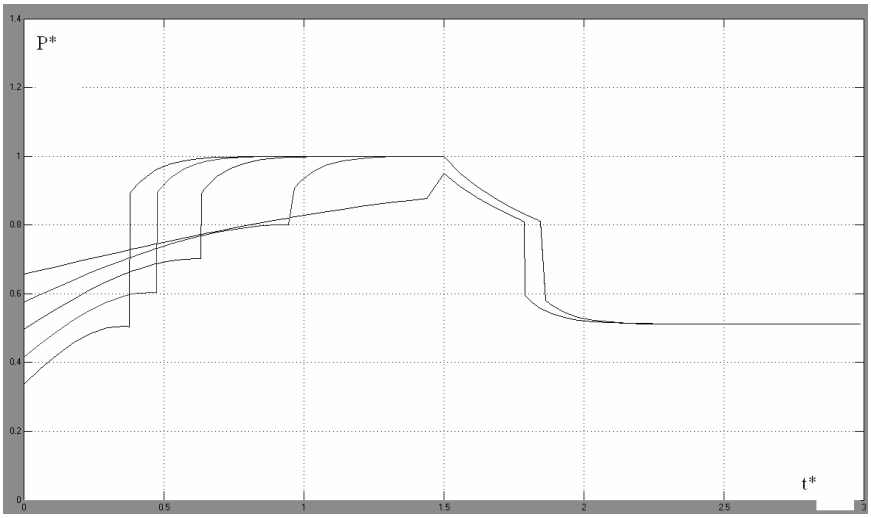


Рис. 3. Графики мгновенной мощности в режиме разгона при различных динамических моментах

Алгоритмы управления моментом отличаются величиной динамического момента или, что тоже самое, интенсивностью разгона до целевой скорости вращения. Рассмотренные варианты соответствуют величинам динамического момента $M_d^* = 0{,}1;\ 0{,}2;\ 0{,}3;\ 0{,}4;\ 0{,}5$ соответственно. Графики отражают изменение мгновенной мощности во времени, выраженное в относительных единицах. Энергия, передаваемая генератору, соответствует площади под кривой мощности.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что выработка электроэнергии будет зависеть от длительности порыва ветрового потока. На рисунке 4 показаны результаты определения выработки в зависимости от величины длительности порыва ветрового потока для различных вариантов алгоритмов управления моментом.

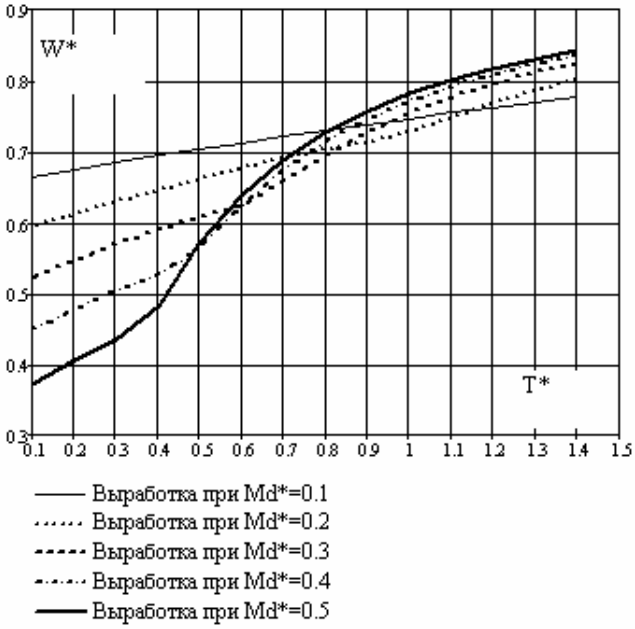


Рис. 4. Графики зависимости выработки от величины длительности порыва ветрового потока для различных динамических моментов

При малых относительных периодах порыва ветрового потока преимущества по выработке, при разгоне электромеханической системы, имеют алгоритмы с малым динамическим моментом системы. И, наоборот, при большей стабильности ветрового потока более эффективными являются алгоритмы с большими динамическими моментами и, следовательно, с большой интенсивностью разгона.

Таким образом, выбор варианта управления зависит от значений величины ветрового потока в последующие моменты времени, и, следовательно, оптимальное управление моментом должно осуществляться на основе прогноза значений ветрового потока.

Данные выводы косвенно подтверждаются результатами, полученными в работе [2], где были рассмотрены вопросы эффективности применения прогнозного алгоритма управления сопротивлением цепи возбуждения генератора постоянного тока с точки зрения повышения выработки электроэнергии ВЭУ. По мнению автора, применение алгоритма управления с учетом динамики приводит к увеличению выработки на 10...12 %.

Выводы.

1. Рассмотренная система относительных величин позволяет применить обобщенный подход к анализу и синтезу алгоритмов управления электромеханической системой ветроэнергетической установки с жесткой аэродинамикой.

2. При использовании системы относительных параметров основные зависимости и соотношения, описывающие электромеханическую систему, значительно упрощаются.

3. Построенная математическая модель системы позволяет исследовать эффективность различных алгоритмов управления ВЭУ для широкого класса ветрогенерирующих систем, проводить их сравнительный анализ и определять области их эффективного применения.

4. Оптимальный алгоритм управления моментом генератора ВЭУ с жесткой аэродинамикой должен строиться на базе прогноза значений величины ветрового потока в последующие моменты времени.

Список использованных источников

1. *Алексеевский Д. Г.* Динамические траектории регулирования ветроэлектрогенерирующей системы на базе сверхсинхронного вентильного каскада / Д. Г. Алексеевский, А. В. Переверзев, В. В. Семенов // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 2. – С. 14-17.

2. *Канов Л. Н.* Оптимизация режима ветроэнергетической установки постоянного тока по максимуму мощности / Л. Н. Канов // Оптимізація виробничих процесів : зб. наук. пр. Вип. 13. – Севастополь, 2011. – С. 91-94.

УДК 681.3.014

С.В. Бойко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ІНЖИНІРИНГУ

С.В. Бойко, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА

S.V. Boyko, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

AUTOMATION OF PREPARATION OF MANUFACTURE OF CASE DETAILS BY A METHOD OF REVERSE ENGINEERING

Пропонується методика автоматизації виготовлення корпусних деталей через оцифровування їх прототипів. Розглянуто особливості роботи з сучасними 3D-сканерами для отримання максимально точних моделей зразків корпусних деталей. Проведено сканування зразка корпусної деталі за допомогою безконтактного лазера; оцифровування моделі і розроблення керуючої програми для верстатів з ЧПК CAM-системі FeatureCAM (Delcam, Plc).

Ключові слова: *3D-сканер, оцифровування, корпусні деталі, ЧПК.*

Предлагается методика автоматизации изготовления корпусных деталей путем оцифровки их прототипов. Рассмотрены особенности работы с современными 3D-сканерами для получения максимально точных моделей образцов корпусных деталей. Проведено сканирование образца корпусной детали с помощью бесконтактного лазера; оцифровка модели и разработка управляющей программы для станков с ЧПУ в CAM-системе FeatureCAM (Delcam, Plc).

Ключевые слова: *3D-сканер, оцифровка, корпусные детали, ЧПУ.*

Presented a method to automate the manufacture casing parts by digitizing their prototypes. The article describes the features of a modern 3D-scanner to obtain the most accurate models of samples case details. Carried scanning the sample case details with a non-contact laser; digitization model and development of control programs for CNC machine tools in CAM-system FeatureCAM (Delcam, Plc).

Key words*: 3D-scanner, digitization, case parts, CNC.*

Постановка проблеми. Нині перед багатьма підприємствами стоїть завдання підвищення якості продукції, що виготовляється. Проектувальники складних промислових об’єктів все частіше вдаються до використання технології 3D-проектування. Високий ступінь детальності 3D-моделі дозволяє зберігати велику кількість інформації про форму та параметри технологічного обладнання й об’єктів. Як наслідок, проектувальники хочуть отримувати сьогодні в ролі вихідних даних не схеми з нанесеними проектними значеннями і фактичними розмірами окремих конструктивних елементів, а дані у тривимірному вигляді, що містять великий обсяг інформації, порівнянний за детальності з проектною цифровою моделлю [1]. Одним з найбільш важливих етапів на шляху досягнення цієї мети є реалізація методу зворотного інжинірингу.

Метод зворотного інжинірингу є одним з найпотужніших прийомів, що дозволяють скоротити час і витрати на розроблення математичної моделі, а часом і єдиною можливістю математичного опису якогось унікального виробу, на яке відсутня конструкторська документація. Йдеться про отримання математичної моделі з фізичної моделі або за вже існуючим виробом зразком.

У зв’язку з появою великої кількості сучасного обладнання для реалізації методу зворотного інжинірингу, актуальним є завдання розроблення методики автоматизації підготовки виробництва з використанням сучасного обладнання. Дослідження проводились в 3D-лабораторії університету Glyndwr (North East, Wales).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні вже існує безліч способів перетворення реальних об'єктів у віртуальні. Але найбільш популярні два з них:

– моделювання об'єктів вручну в програмах-редакторах;

– сканування необхідних об'єктів за допомогою 3D-сканера з подальшою обробкою в тих же редакторах.

У різний час перевага віддавалася то одному, то іншому способу. Це залежало від появи на ринку свіжих технологій для оцифровування, алгоритмів візуалізації, нового програмного забезпечення, що дозволяє простіше й ефективніше обробляти 3D-об'єкти.

Нині сформувалися дві принципово різні методики сканування 3D-об'єктів – контактна і безконтактна [2; 3].

Контактний 3D-сканер – це пристрій, що має спеціальний щуп, який вивчає контури об'єкта і на основі цього будує його 3D-копію на екрані. Контактні сканери досить прості у використанні, володіють високою точністю і добре підходять для сканування об'єктів простих форм, наприклад, промислових деталей. Але їх застосування для об'єктів з більш складною геометрією, де, крім граней з чітко окресленими межами, є плавні лінії і переходи, буде вкрай незручним. Більш досконалим способом тривимірного сканування є безконтактний. Це пояснюється тим, що 3D-сканер також використовує ефект відбиття хвиль від поверхні об'єкта сканування.

У результаті аналізу функціональних можливостей безконтактних 3D-сканерів, були виявлені основні їх переваги:

- використання 3D-сканерів дозволяє швидше виводити товар на ринок і отримувати максимально точні моделі (що сприяє зменшенню браку);
- аналіз відповідності фізичних деталей заданим технічним вимогам;
- виявлення браку в інструментальному оснащенні і діагностування експлуатаційних проблем на ранніх стадіях виробництва;
- автоматизація виготовлення штампового оснащення в автомобільній промисловості;
- можливість контролю без руйнування зразка.

На сьогодні існує жорстка конкуренція між виробниками програмного забезпечення для технології зворотного інжинірингу. Одним з найвідоміших представників є компанія Delcam, яка представлена на ринку такими потужними пакетами для реверс-інжинірингу, як CopyCAD та PowerINSPECT. Використання цього комплексу дозволяє в рази скоротити час запуску продукції в серійне виробництво і заощадити значні кошти на розроблення всього проекту.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Слід чітко розуміти, що 3D-сканер – це всього лише високоточний вимірювальний інструмент, він дозволяє вивести виробництво на новий технологічний рівень, але не може замінити існуюче. Для роботи з подібним обладнанням необхідні висококласні (а значить і високооплачувані) фахівці. Постійна практика роботи, високі витрати на утримання обладнання. Тому в зв'язку з появою великої кількості сучасного обладнання для реалізації методу зворотного інжинірингу виникає необхідність описання принципів роботи такого обладнання і розроблення методики вирішення окремих актуальних завдань машинобудування за допомогою 3D-сканерів. Зокрема, використання сучасного 3D-сканера FARO Laser Scan Arm і Nikon Metris Custom Bay для автоматизації підготовки виробництва корпусних деталей має багато особливостей, обумовлених типом зразків для сканування, і потребує детального описання принципів роботи.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є побудова математичної моделі траверзи спортивного мотоцикла за допомогою оцифровування фізичного прототипу і підготовка керуючої програми для верстата з ЧПК для подальшого виготовлення деталей.

Виклад основного матеріалу. Сканування і розроблення математичної моделі проводились у 3D-лабораторії університету Glyndwr (North East, Wales).

Процес зворотного інжинірингу включає такі етапи:

- аналіз деталі;
- сканування деталі;
- побудова базових поверхонь (перетворення точок у поверхні);
- контроль базових поверхонь;
- побудова математичної моделі (створення 3D-моделі);
- контроль математичної моделі та її доробка (при необхідності) до необхідної точності;
- здача математичної моделі замовнику.

Як об'єкт дослідження обрано верхню траверзу спортивного мотоцикла (рис. 1), яка є яскравим представником корпусних деталей зі складним контуром.

Рис. 1. Зразок для сканування

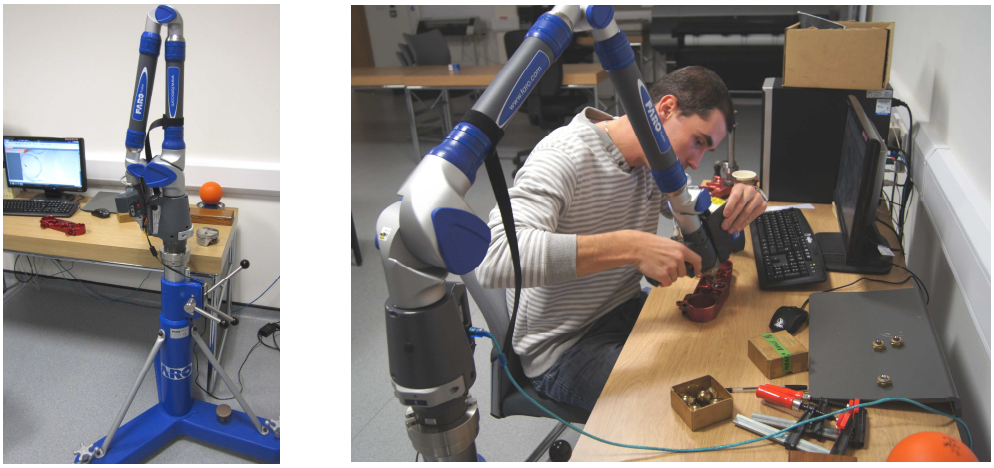
У процесі аналізу деталі поверхня траверзи була умовно розбита на три великі групи:

1. Поверхні-примітиви: площина, циліндр, конус, сфера та ін.

2. Поверхні складної форми, тобто поверхні, які не потрапляють у першу групу і потребують більш щільнішого накладання скан-ліній. Необхідність цього пояснюється дуже просто – чим рівніше йдуть скан-лінії, тим простіше надалі будувати поверхні з набору таких кривих. При цьому тактика розмітки безпосередньо залежала від стратегії подальшої побудови цієї поверхні.

3. Радіуси заокруглень.

Сканування деталі виконувалось за допомогою сучасного 3D-сканера FARO Laser Scan Arm (рис. 2): лазерне сканування з точністю: 0,035 мм; дистанція сканування: 95 мм; глибина поля: 85 мм; ефективна ширина лазерного сканування: 34 мм (ближнє поле), 60 мм (дальнє поле); кількість точок на лінію: 640; швидкість сканування: 30 кадрів за секунду, 19200 точок за секунду; тип лазера: 660 нм, CDRH Class II/IEC Class 2M; робочій діапазон температур: від +10° С до +40°С; допустимі коливання температури: 3°С/ 5 хв.



а *б*

Рис. 2. Сканування верхньої траверзи:
а – 3D-сканер FARO Laser Scan Arm; б – процес сканування

Під час сканування зразка в першу чергу були виміряні поверхні першої групи (визначені на етапі аналізу деталі). Далі була виміряна друга група поверхонь, у результаті чого були отримані сукупність точок, за якими надалі в пакеті GeoMagic Studio будувалися поверхні. Всі необхідні вимірювання і процес сканування були виконані за один день.

На наступному етапі, після закінчення вимірів дані були передані в систему GeoMagic Studio, в якій були побудовані базові (основні формоутворюючі) поверхні (рис. 3). Цей етап необхідний для перетворення сукупності точок, отриманих у процесі сканування на поверхні.

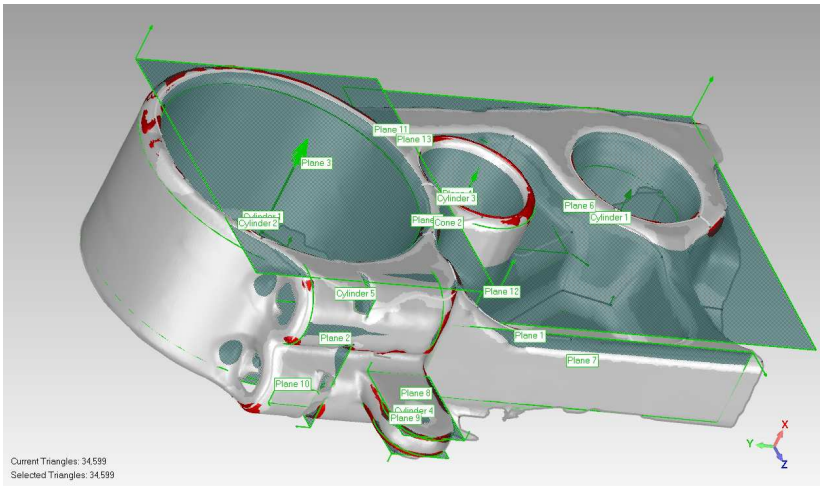


Рис. 3. Побудова формоутворюючих поверхонь

На цьому етапі також провели корекцію і контроль базових поверхонь з метою виявлення максимального відхилення, яке може виникнути при апроксимації кривих (скан-ліній) і поверхонь. Тільки після такого аналізу ми можемо судити про коректну побудову математичної моделі. У тих місцях, де відхилення перевищують допустимі, необхідно зробити додаткове сканування.

Після цього математична модель об’єкта створюється за допомогою використання вже наявних базових поверхонь і даних сканування. На цьому етапі добудовуються дрібні ділянки (різного роду ребра жорсткості і т. д.), будуються округлення.

Наступний етап – це імпортування математичної моделі в CAM систему FeatureCAM. Це система для підготовки керуючих програм з високим ступенем автоматизації прийняття рішень, що дозволяє мінімізувати час розроблення КП для верстатів з ЧПК. В основі CAM-системи лежить автоматичне розпізнавання типових елементів твердотільної моделі та їх автоматичне оброблення із застосуванням вбудованої технологічної бази знань.

CAM-система FeatureCAM містить вбудовану базу даних ріжучих інструментів і режимів різання, а також бібліотеку постпроцесорів. Номенклатура бази даних інструменту містить тисячі найменувань і дозволяє редагувати або додавати власний інструмент, а табличні режими різання і подач можуть бути легко відредаговані [4].

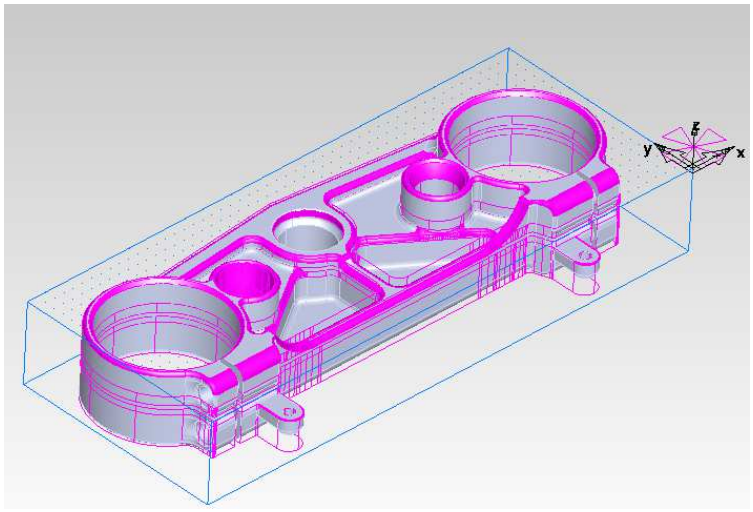
Щоб отримати в FeatureCAM керуючу програму, програміст-технолог повинен виконати такі дії:

1. Створити в FeatureCAM або імпортувати твердотільну CAD-модель.

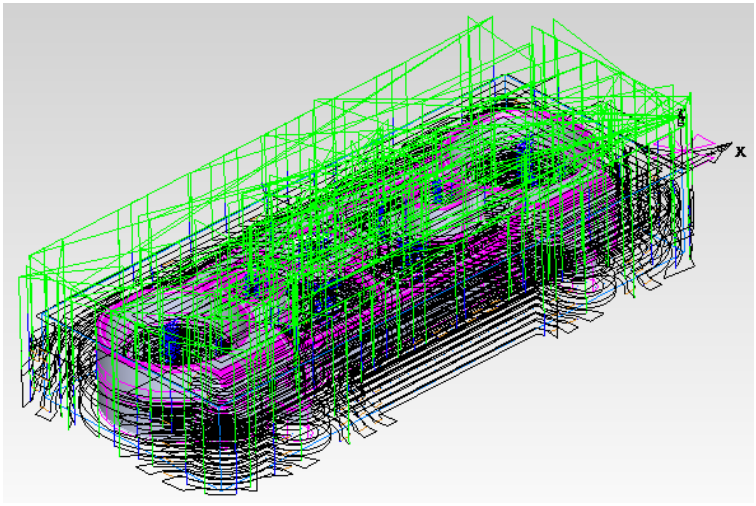
2. Автоматично або вручну ідентифікувати елементи деталі (отвори, пази, площини, кишені та ін.).

3. Натиснути кнопку розрахунку програм та симуляції оброблення.

4. На основі закладених у ній алгоритмів CAM-система FeatureCAM повністю автоматично виконує такі дії: вибирає ріжучий інструмент; призначає чорнове і чистове оброблення; розбиває припуск на проходи і розраховує режими різання; розраховує керуючу програму в G-кодах (рис. 4).



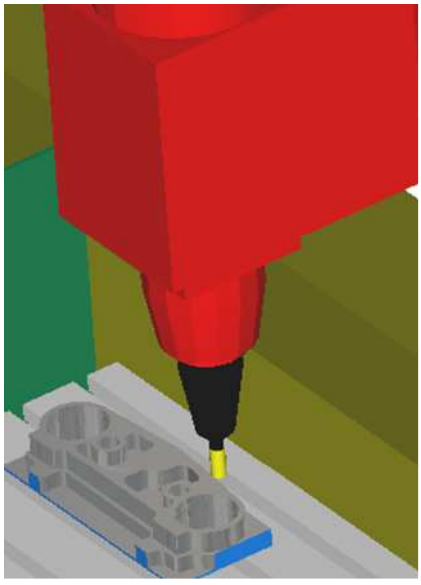
а



б

Рис. 4. Імпорт моделі в систему FeatureCAM:
а – розпізнавання елементів моделі; б – підготовка траєкторій руху інструмента

Після цього керуюча програма готова і може бути відправлена на верстат з ЧПК (рис. 5).



```
N125865X-8.6263Y1.4412
N125870X-8.5654Y1.4608
N125875X-8.5231Y1.4768
N125880X-8.474Y1.4984
N125885X-8.4435Y1.5132
N125890X-8.3987Y1.5378
N125895X-8.3494Y1.5682
N125900X-8.3079Y1.597
N125905G0X-8.9703Y1.4053Z0.9843
N125910Z0.1181
N125915G1Z-0.1958F29.5
N125920X-9.0223Y1.4102F59.0
N125925X-9.0832Y1.4194
N125930X-9.1442Y1.4325
N125935X-9.1939Y1.4464
N125940X-9.2356Y1.4601
N125945X-9.2884Y1.4803
N125950G0Z0.9843
N125955X0.Y0.M2
```

Рис. 5. Імітація оброблення і генерація керуючої програми для верстата з ЧПК

Висновки і пропозиції.

- Використання в комплексі сучасного програмного забезпечення і 3D-сканерів дозволило прискорити й автоматизувати процес підготовки виробництва корпусних деталей.

- На підготовку технології виготовлення верхньої траверзи спортивного мотоцикла було витрачено 2 дні. При цьому було побудовано математичну модель траверзи за допомогою її сканування і розпізнавання та розроблено керуючу програму для верстата з ЧПК у системі FeatureCAM.

Список використаних джерел

1. *Комплексное* применение трехмерного лазерного сканирования и технологий AVEVA для контроля строящихся объектов [Электронный ресурс] // САПР и графика. – 2012. – № 9. – Режим доступа : http://www.sapr.ru/issue.aspx?iid=1071.

2. *Технология* и перспективы 3D-сканеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.foto-business.ru/3D-skaneryi/3D-skaneryi-Artec/.

3. *3D-сканеры* в машиностроении [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.3dprint-r.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=19:3d---&catid=4:2013-02-21-17-18-47.

4. *CAM-система* FeatureCAM 2011: возможности новой версии [Электронный ресурс] // САПР и графика. – 2010. – № 10. – Режим доступа : http://www.sapr.ru/article.aspx?id=21722&iid=992.

УДК 624.014.2:621.81:[620.173.26]

В.М. Кондель, канд. техн. наук
М.М. Шевчук, студент
Р.Т. Холодков, студент
Полтавський національний педагогічний університет імені В.Г. Короленка, м. Полтава, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В.Н. Кондель, канд. техн. наук
Н.Н. Шевчук, студент
Р.Т. Холодков, студент
Полтавский национальный педагогический университет имени В.Г. Короленко, г. Полтава, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТУКЦИЙ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН

V.M. Kondel, Candidate of Technical Sciences
M.M. Shevchuk, student
R.T. Kholodkov, student
Poltava National Pedagogical University named after V.G. Korolenko, Poltava, Ukraine

THE INVESTIGATION OF RATIONAL SECTIONS FOR COMPRESSED STRUCTURES AND PARTS OF MACHINES

Досліджено та спроектовано раціональні форми перерізів стальних стиснутих елементів конструкцій та деталі машин. Проведено аналіз експериментальних даних про роботу конструкцій та теоретичних розроблень щодо їх розрахунків на стійкість. За результатами дослідів побудовані графіки та запропоновані нові прості формули для визначення розмірів оптимальних перерізів стиснутих елементів.

Ключові слова: *стальні стиснуті елементи, розрахунки на стійкість, коефіцієнт поздовжнього згинання, раціональні форми перерізів.*

Исследованы и спроектированы рациональные формы сечений стальных сжатых элементов конструкций и детали машин. Проведен анализ экспериментальных данных о работе конструкций и теоретических разработок их расчетов на устойчивость. По результатам исследований построены графики и предложены новые простые формулы для определения размеров оптимальных сечений сжатых элементов.

Ключевые слова: *стальные сжатые элементы, расчеты на устойчивость, коэффициент продольного изгиба, рациональные формы сечений.*

The authors research the rational sections of compressed steel structures and parts of machines. The analysis of experimental and theoretical data of the behaviour of compressed structures and their members are provided. The new approaches to the design of optimal sections are described.

Key words: *compressed steel members, buckling analysis, stress reduction factor, rational sections.*

Постановка проблеми. Протягом всього терміну експлуатації елементи конструкцій та деталей машин зазнають різних пошкоджень, природа яких залежить від їх напружено-деформованого стану та умов роботи (розтяг або стиск, згинання, кручення, згинання з крученням, високі та низькі температури, змінне навантаження, агресивне середовище, радіаційне опромінення тощо). Серед усіх елементів конструкцій та деталей машин будь-якого сучасного підприємства значну частину складають ті, які працюють на стискання: колони, стійки, верхні пояси ферм, гвинти в передачах гвинт-гайка, циліндричні та конічні гвинтові пружини, голки у швейних машинах та інші. Їх розраховують не тільки на міцність, але й на стійкість, оскільки втрата стійкості є дуже небезпечним явищем, внаслідок чого відбувається некерований ріст деформацій і стиснутий стержень руйнується практично миттєво, що виключає будь-яку можливість вжиття дієвих заходів щодо запобігання аваріям і катастрофам. Саме тому тривалий час проводяться дослідження стійкості стиснутих елементів для розроблення заходів щодо недопущення подібних надзвичайних ситуацій у майбутньому. Одним з основних напрямків запобігання цим негативним явищам або зменшення їх впливу на роботу стиснутих елементів є дослідження та проектування раціональних форм перерізів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вагомий внесок для вирішення цієї проблеми здійснили видатні вчені XVIII-XX століть – Л. Ейлер, Ф. Енгессер, Ф. Ясинський, Л. Тетмайєр, Т. Карман, Ф. Шенлі та інші [1-3]. Вони запропонували формули для визначення критичної сили і напруження, які є небезпечними для стиснутого стержня, залежно від його гнучкості, матеріалу, способів закріплення кінців, схеми та виду навантаження, а також умову стійкості з коефіцієнтом поздовжнього згинання φ, яку використовують під час розрахунків стиснутих стержнів:

$$\sigma = \frac{F}{A} \le [\sigma]_{st} = \varphi[\sigma]. \qquad (1)$$

Досліди [1-5] показали, що коефіцієнт φ залежить не тільки від гнучкості стержня λ, але й від міцності матеріалу, з якого він виготовлений. Зокрема, для сталі з підвищенням її міцності та зростанням гнучкості коефіцієнт φ зменшується [6; 7], тому для практичних розрахунків виведені формули щодо визначення цього коефіцієнта для звичайних та високоміцних сталей з урахуванням його залежності від вищезазначених чинників [6; 7].

Одним з основних напрямків запобігання вищезгаданим негативним явищам або зменшення їх впливу на роботу конструкцій у цілому є дослідження та проектування раціональних форм перерізів. З погляду економічності раціональною є така форма поперечного перерізу стійки, при якій найменший радіус інерції $i_{\min}$ при певній площі є найбільшим, тобто чим вище значення питомого радіуса інерції

$$\xi = \frac{i_{\min}}{\sqrt{A}}, \qquad (2)$$

тим кращим є переріз. Для коробчастих і трубчастих перерізів ξ = 1,6...2,3 (при d/D = 0,8...0,95; d і D – внутрішній та зовнішній діаметр труби); для кутника – 0,3...0,5; двотавра – 0,27...0,41; швелера – 0,29...0,41; квадрата – 0,289; круга – 0,293; прямокутника (при $h = 2b$) – 0,204 [2; 3].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз цих даних показує, що раціональними є коробчасті та трубчасті тонкостінні перерізи, але під час

проектування слід передбачити розташування діафрагм (ребер жорсткості) на певних відстанях уздовж стержня, які перешкоджають появі місцевих деформацій стінок. Крім того, слід прагнути до того, щоб перерізи були рівностійкими в усіх напрямках. Цьому критерію відповідають коробчасті і трубчасті, квадратні та круглі перерізи. Нераціонально застосовувати двотаврові та суцільні прямокутні перерізи [2; 3].

Але дуже часто на практиці колони, стійки, стержні виготовляють складеними із прокатних профілів: двотаврів, швелерів, кутників (рис. 1, 2) [4; 5], тому виникає потреба у проектуванні раціональних перерізів саме таких конструкцій.

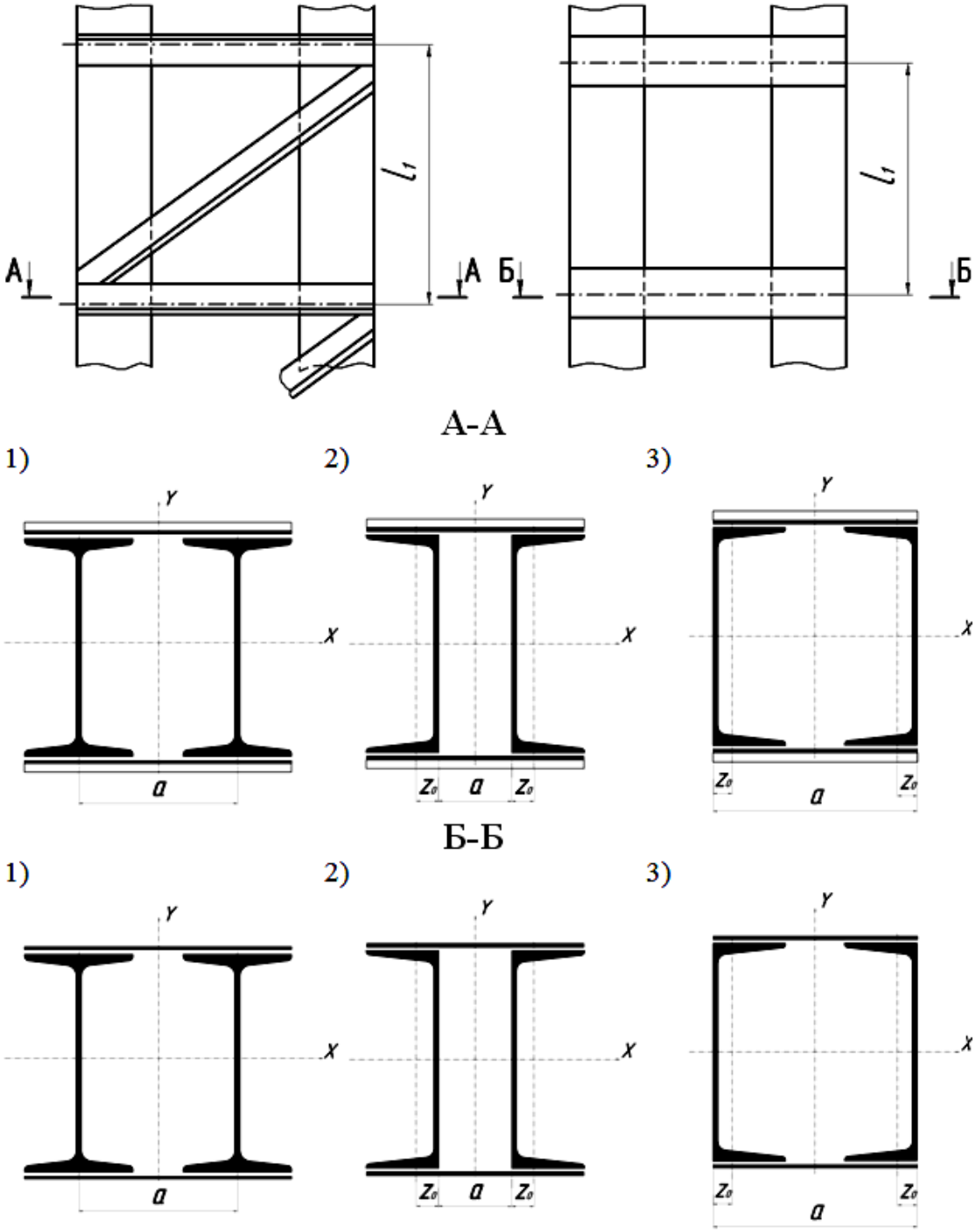


Рис. 1. Варіанти складених перерізів стиснутих конструкцій із двотаврів та швелерів, з'єднаних кутниками або планками

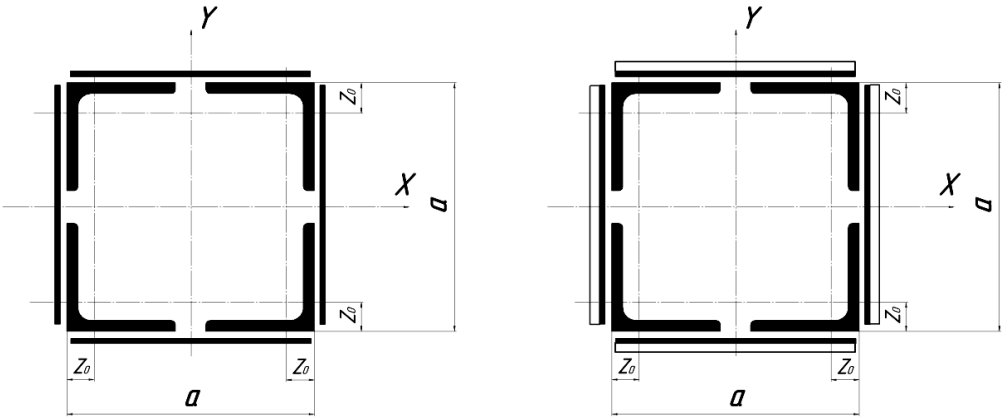


Рис. 2. Варіанти складених перерізів стиснутих конструкцій з кутників

Мета статті. Головною метою цієї роботи є дослідження раціональних форм складених і суцільних перерізів для стальних стиснутих елементів конструкцій та деталей машин.

Виклад основного матеріалу. Для стиснутих конструкцій, складених із прокатних профілів, раціональними будуть ті, в яких гнучкість у двох різних напрямках буде однаковою, тобто

$$\lambda_x = \lambda_y, \tag{3}$$

де $\lambda_x = \mu_x l / i_y$; $\lambda_y = \mu_y l / i_x$; $i_x = \sqrt{I_x / A}$; $i_y = \sqrt{I_y / A}$; μ_x, μ_y – коефіцієнти зведення довжини стержня; l – довжина стержня; i_x, i_y і I_x, I_y – радіуси і моменти інерції; A – площа поперечного перерізу стиснутого стержня.

Якщо прийняти $\mu_x = \mu_y = \mu$, тоді залежність (3) матиме вигляд

$$I_x = I_y. \tag{4}$$

Використовуючи цю умову, визначимо відстань α між осями двотаврів (рис. 1, схема 1)

$$\alpha = 2\sqrt{\frac{I^I{}_x - I^I{}_y}{A}}. \tag{5}$$

Аналогічно визначаємо відстань α між стінками двох швелерів у складених перерізах:

для схеми 2 (рис. 1) $$\alpha = 2\left(\sqrt{\frac{I^I{}_x - I^I{}_y}{A}} - Z_0\right), \tag{6}$$

для схеми 3 (рис. 1) $$\alpha = 2\left(\sqrt{\frac{I^I{}_x - I^I{}_y}{A}} + Z_0\right). \tag{7}$$

За формулами (5-7) можна визначити відстань α для всіх двотаврів (№ 10...60) та швелерів (№ 8...40), причому

$$\alpha = f(N), \tag{8}$$

де N – це номер швелера або двотавра.

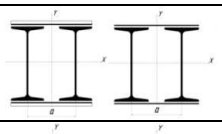
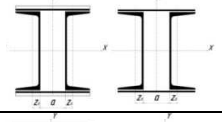
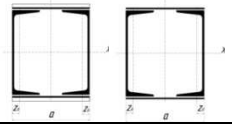
Дослідження показали, що функція (8) має вигляд, який для практичних розрахунків можна прийняти за пряму лінію (рис. 3), тобто

$$\alpha = CN + D, \tag{9}$$

де C і D – параметри в см, визначені за методом найменших квадратів (табл.).

Таблиця

Результати розрахунків параметрів C і D

Схема	Параметри, см		Середня похибка	
	C	*D*	арифметична, $\lvert\delta\rvert_m$	квадратична, σ_m
	0,781	0,362	1,42	1,94
	0,686	-2,304	0,65	0,82
	0,876	1,883	1,61	2,03

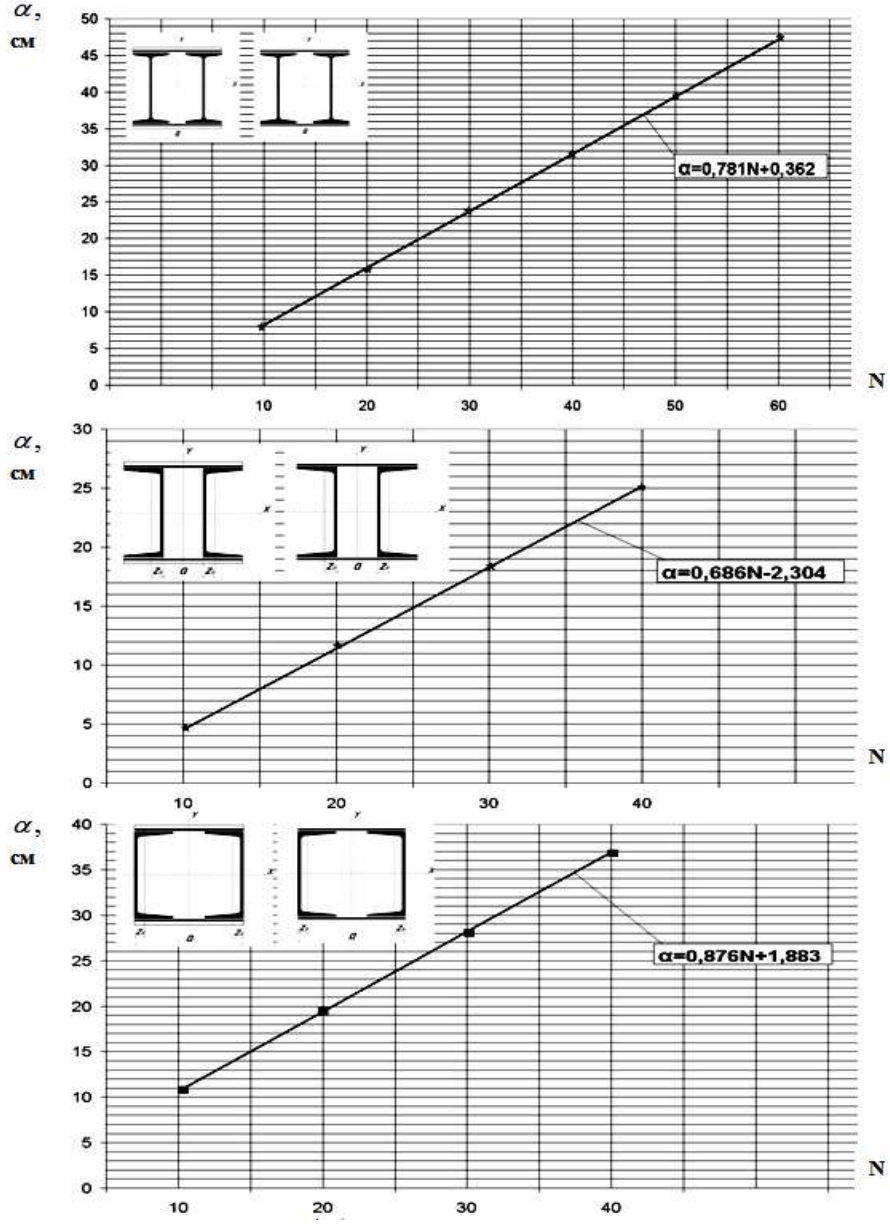


Рис. 3. Залежності $\alpha = f(N)$ *для складених перерізів із двотаврів та швелерів*

Результати всіх розрахунків, подані в таблиці, мало чим відрізняються від експериментальних даних, про що свідчать відповідні невеликі середні арифметичні та квадратичні похибки [8].

Аналогічно можна провести розрахунки для проектування перерізів стиснутих елементів, складених із кутників (рис. 2).

Слід зазначити, що необхідною умовою безпечної роботи складених конструкцій є наявність достатньо міцного кріплення (решітки з кутників або планок) для забезпечення сумісної роботи всіх несучих елементів перерізу (рис. 1). Якщо два швелера або двотавра з'єднати недостатньо міцною решіткою, то кожний елемент складеного стержня буде працювати самостійно і стійкість його виявиться набагато менше стійкості стержня, в якому обидві половини є одним цілим. Саме недостатня увага до проектування надійних з'єднань частин стиснутого стержня складеного перерізу призводила до значних аварій і катастроф, особливо при будівництві великих мостів [1].

Для складених стиснутих конструкцій стійкість відносно матеріальної X та вільної Y осей (рис. 1) перевіряємо різними способами. Перевірку стійкості елемента відносно осі X, яка перетинає переріз, виконуємо як для стінок із суцільними поперечними перерізами. Під час перевірки стійкості конструкції відносно осі Y, яка не перетинає переріз, коефіцієнт φ знаходимо не як функцію гнучкості λ_y, а як функцію зведеної гнучкості λ_{ef}, яка для випадку решітки з планок (рис. 1, Б-Б):

$$\lambda_{ef} = \sqrt{\lambda_y^{\,2} + \lambda_1^{\,2}}\,. \qquad (10)$$

При розрахунку гнучкості λ_y вважаємо вісь Y матеріальною віссю. Гнучкість однієї вітки на довжині l_1 (рис. 1) $\lambda_1 = l_1 / i_{\min}$. Планки розташовуємо таким чином, щоб гнучкість окремих віток була менше гнучкості, визначеної відносно матеріальної осі X (рис. 1), але не більше 40, тобто $\lambda_1 \le 40$ [4; 5].

Аналогічно розраховуємо решітку із кутників (рис. 2, А-А).

Багато стиснутих конструкцій та їх елементів мають суцільний поперечний переріз у вигляді круга, квадрата, прямокутника (наприклад, із співвідношенням сторін $h/b = k_0$, де $k_0 \ge 1$). Якщо $k_0 = 1$, прямокутник перетворюється у квадрат, тому визначимо, яка форма перерізу є найбільш оптимальною.

Візьмемо два стержні круглого та прямокутного перерізів, площі яких однакові, тобто $A_1 = A_2 = A$, рівної довжини ($l_1 = l_2 = l$) з однаковим закріпленням кінців ($\mu_1 = \mu_2 = \mu$) та виготовлені з однієї і тієї ж марки сталі. Очевидно, що найбільш оптимальним буде той переріз, який витримає найбільше навантаження. За умовою стійкості (1) визначаємо найбільше навантаження, яке спроможний витримати стиснутий елемент:

$$[F]_{\max} \le \varphi[\sigma]A\,. \qquad (11)$$

Оскільки круглий та прямокутний стержні виготовлені з одного матеріалу, то $[\sigma]_1 = [\sigma]_2 = [\sigma]$. Крім того, вони мають однакову площу перерізу, тобто $A_1 = A_2 = A$. Це означає, що шуканим є той переріз, в якого коефіцієнт поздовжнього згинання φ найбільший.

У свою чергу, цей коефіцієнт залежить від гнучкості стержня λ, яка визначається за відомою формулою $\lambda = \mu l / i_{\min}$, де $i_{\min} = \sqrt{I_{\min}/A}$. Мінімальні моменти інерції $I_{\min}$ для круглого та прямокутного перерізів відповідно становлять $I_1 = \pi d^4/64$ і $I_1 = hb^3/12$. Оскільки $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ і $l_1 = l_2 = l$, найбільш оптимальним є той переріз, у якого мінімальний момент інерції є найбільшим.

Визначимо моменти інерції перерізів через площу A. Для круглого перерізу $A = A_1 = \pi d^2/4$, звідки $d = \sqrt{4A/\pi}$ і $I_1 = A^2/(4\pi) = 0{,}0796A^2$.

Аналогічно, для прямокутного перерізу $A = A_2 = bh = k_0 b^2, b = \sqrt{A/k_0}$ і $I_2 = A^2/(12k_0) = 0{,}0833A^2/k_0$. Для квадратного перерізу ($k_0 = 1$) $I_2 = 0{,}0833A^2$, а це означає, що саме він є найбільш оптимальним з умови стійкості.

Визначимо k_0, при якому стержні круглого та прямокутного перерізів мають однакову стійкість, тобто при $I_1 = I_2$ $A^2/(4\pi) = A^2/(12k_0)$, звідки $k_0 = \pi/3 = 1{,}047$.

Висновки і пропозиції. 1. Під час проектування стиснутих конструкцій та їх елементів складених перерізів, знаючи лише номер двотавра або швелера (без таблиць з їх геометричними характеристиками), можна за простою формулою (9) визначити відстань α між осями або стінками профілів залежно від схеми їх розташування і достатній міцності з'єднань стиснутих елементів так, щоб запроектований переріз був раціональним.

2. Найбільш оптимальним суцільним перерізом елемента за умовою його стійкості є квадратний переріз. При співвідношенні сторін $h/b = 1{,}047$ стержні круглого та прямокутного поперечних перерізів мають однакову стійкість за умови рівності площ цих перерізів ($A_1 = A_2 = A$), способів закріплення кінців ($\mu_1 = \mu_2 = \mu$), довжини стійок ($l_1 = l_2 = l$), виготовлених з однієї і тієї ж марки сталі ($[\sigma]_1 = [\sigma]_2 = [\sigma]$).

3. Оскільки стиснуті елементи конструкцій виготовляються з різних матеріалів, а не тільки зі сталі, слід провести додаткові дослідження коефіцієнтів поздовжнього згинання φ саме для цих матеріалів, враховуючи їх міцність, гнучкість стержнів та інші чинники.

4. Розглядаючи найбільш поширені випадки закріплення кінців стиснутих елементів, важливо проаналізувати вплив пружності або жорсткості опор на значення коефіцієнта зведення довжини μ.

5. Аналогічні дослідження слід провести для стиснутих елементів сталого та змінного поперечних перерізів, проаналізувати їх стійкість залежно від різних схем навантаження (стискаючих зосереджених сил чи розподільного навантаження), геометрії стержня (закону зміни моментів інерції перерізу вздовж осі стійки) та інших параметрів.

Всі ці розроблення дозволять отримати значний економічний ефект, підвищити надійність та довговічність стиснутих елементів конструкцій та деталей машин і запобігти багатьом аваріям і катастрофам у майбутньому.

Список використаних джерел

1. *Беляев Н. М.* Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Главная редакция физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1976. – 608 с.

2. *Писаренко Г. С.* Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – К. : Вища школа, 1993. – 655 с.

3. *Писаренко Г. С.* Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1988. – 736 с.

4. *Лихтарников Я. М.* Расчет стальных конструкций : справочное пособие / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков. – К. : Будівельник, 1984. – 368 с.

5. *Николаев Г. А.* Сварные конструкции. Расчет и проектирование : учебник / Г. А. Николаев, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1990. – 446 с.

6. *Курмаз К. Г.* Визначення коефіцієнтів поздовжнього згинання для стальних стиснутих деталей / К. Г. Курмаз, Р. В. Бабенко, А. Ю. Шило // Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання : зб. тез II Всеукр. студ. наук.-техн. конф. (23-24 квітня 2009 р.) : в 2 т. Т. 1. / Тернопільський держ. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. – Тернопіль : ТДТУ, 2009. – С. 205.

7. *Кондель В. М.* Дослідження стійкості стальних стиснутих елементів сталого та змінного поперечних перерізів / В. М. Кондель, А. І. Павліченко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Фізико-математичні науки. – 2011. – № 4. – С. 76-79.

8. *Проектування* раціональних перерізів стиснутих елементів конструкцій та деталей машин / В. М. Кондель, М. М. Шевчук, Р. Т. Холодков, А. С. Макарчук // Проблеми сучасного будівництва : матеріали Всеукраїнської інтернет-конф. молодих учених і студентів (21-22 листопада 2012 р.). – Полтава : Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2012. – С. 156-160.

УДК 621.91:678.5

І.О. Булах, аспірант
О.В. Глоба, канд. техн. наук
НТУУ «КПІ», Механіко-машинобудівний інститут, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ МЕТОДІВ НЕРУЙНУЮЧОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

И.А. Булах, аспирант
А.В. Глоба, канд. техн. наук
НТУУ «КПИ», Механико-машиностроительный институт, г. Киев, Украина

АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

I.O. Bulakh, post-graduate student
O.V. Hloba, Candidate of Technical Sciences
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Mechanical Engineering, Kyiv, Ukraine

THE ANALYSIS OF METHODS OF NON-DESTRUCTIVE FLAW DETECTION OF THE PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS

Розглянуто методи неруйнуючої дефектоскопії конструкцій з полімерних композиційних матеріалах при їх виготовленні, механічному обробленні та експлуатації. Проаналізований рівень застосовності та інформативність кожного з методів для ПКМ. Особливу увагу сконцентровано на методах дефектоскопії процесів розшарування та утворення тріщин у композитах, що значно знижують експлуатаційні характеристики конструкцій.

Ключові слова: *неруйнуюча дефектоскопія, полімерні композиційні матеріали, розшарування, руйнування матеріалу.*

Рассмотрены методы неразрушающей дефектоскопии конструкций из полимерных композиционных материалах при их изготовлении, механической обработке и эксплуатации. Проанализирован уровень применимости и информативность каждого из методов для ПКМ. Особое внимание сконцентрировано на методах дефектоскопии процессов расслоения и образования трещин в композитах, которые значительно снижают эксплуатационные характеристики конструкций.

Ключевые слова: *неразрушающая дефектоскопия, полимерные композиционные материалы, расслоение, разрушение материала.*

The methods of non-destructive control of polymeric composite materials during their manufacture, machining and maintenance were considered. The level of applicability and the information content of each methods for the PCM was analyzed. The particular attention is focused on methods of controlling the processes of stratification and formation of cracks in the composites what significantly reduce the performance designs.

Key words: *non-destructive inspection, polymer composites, delamination, the destruction of the material.*

Постановка проблеми. Розвиток авіаційної і космічної техніки пов’язаний з розширенням застосування композиційних матеріалів, які мають високі фізико-механічні, теплофізичні, діелектричні характеристики. Проблема діагностики композитних матеріалів по фактичному стану є досить актуальною, оскільки дефекти структури, що виникають при виготовленні та у процесі експлуатації, можуть істотно зменшити міцність матеріалу. Тому особливе значення має розроблення неруйнівних методів діагностики, що дозволяють контролювати не тільки процес виготовлення, а й зміни структури композиту в процесі експлуатації та механічного оброблення виробів. Дефектоскопія шаруватих конструкцій пов’язана в основному з визначенням дефектів технологічного профілю, однак дослідження експлуатаційних дефектів, а також дефектів, що виникають у процесі механічного оброблення, особливо для конструкцій багаторазового використання або тривалого зберігання, також є актуальними. Процеси механічного оброблення у КМ відбуваються не так, як у металах, за рахунок анізотропії композиційних матеріалів. У результаті виникають різного роду дефекти (як геометричних параметрів, так і фізико-хімічного стану матеріалу), які значно знижують якість конструкцій. Тому важливим є розгляд методів неруйнуючого контролю виробів з КМ, а також аналіз рівня застосовності кожного з них.

Аналіз досліджень і публікацій. Щодо неруйнуючого контролю конструкцій з композиційних матеріалів, було запропоновано та розглянуто деякі методи. Зокрема,

А.А. Карабутов [2] розглянув імпульсну акустичну спектроскопію, досліджувалися лазерний оптоакустичний та лазерний ультразвуковий методи [1; 5]. Багато уваги приділено дослідженню поширення акустичних та ультразвукових хвиль у композиційних матеріалах [1-4]. Також розглядались електромагнітні, теплові методи, метод термопар, імпедансний, велосиметричний методи тощо та межі їх застосовності до виробів з композиційних матеріалів, зокрема для вугле- та склопластиків. Відзначається як перспективний СВЧ-метод контролю мікроструктурних дефектів і механічних властивостей матеріалів на сантиметрових хвилях, запропоновані конструкції СВЧ-дефектоскопа, який дозволяє визначити внутрішні напруги і тріщини в контрольованому виробі.

Мета статті. Розглянути наявні методи неруйнуючого контролю конструкцій та застосування цих методів до виробів з композиційних матеріалів. Розкрити перспективи подальшого дослідження та впровадження нових методів контролю КМ.

Виклад основного матеріалу.

Аналіз наявних методів контролю

У виробі з композиційного матеріалу після намотування у процесі полімеризації через внутрішні напруги, нерівномірного розподілу зв'язуючого та інших технологічних факторів, а також внаслідок механічного оброблення можуть виникати розшарування, рихлоти, тріщини, сколи, прижоги та ін. Нині контроль багатошарових композицій проводиться тіньовим ультразвуковим методом з використанням датчиків, що з'єднані з локальною імерсійною ванною. Проте тіньовий метод контролю не дозволяє визначати глибину залягання дефектів і конкретизувати їх знаходження.

Застосування імпедансного, велосиметричного та інших методів неефективні за невеликої товщини композиційного матеріалу і низької чутливості. Для визначення тріщин у неметалічних матеріалах у наш час широко використовуються акустичний, ультразвуковий, імпульсний, радіаційний методи і метод, заснований на властивості фотопружності. Істотним недоліком імпульсного методу є проблема забезпечення надійного акустичного контакту випромінювача і приймача в різних місцях виробів, оскільки неоднаковість втрат ультразвукової енергії в контактах призводить до великих похибок. Імпульсний метод чинить помітний вплив на властивості самого КМ.

Радіографічний метод забезпечує визначення концентрації та орієнтації наповнювача, тріщин у смолі, неточності кроку намотування і т. д., але він не знайшов широкого застосування через трудомісткість процесу контролю.

Метод фотопружності покриттів дозволяє виміряти розмір основних деформацій виробу та напрямки деформацій, а також спостерігати місця концентрації напруг і наявності тріщин. Він заснований на зміні поляризації і заломлення світла у фотопружних покриттях, нанесених на поверхню виробу. Застосування методу фотопружних покриттів в умовах виробництва стикається з певними труднощами, обумовленими його нетехнологічністю і трудомісткісткістю (потрібне нанесення покриття на всю поверхню виробу, потім видалення покриття, контроль повноти видалення, приготування покриття). Крім того, розшифрування результатів контролю представляє також значні труднощі.

Виявлення тріщин у вугле- та склопластикових виробах можливо з використанням емісії хвиль напружень. Недоліком методу є складність апаратури і необхідність навантаження виробів внутрішнім тиском, у результаті чого значно знижується міцність виробу і надійність його роботи при наступних випробуваннях. Відзначається як перспективний СВЧ-метод контролю мікроструктурних дефектів і механічних властивостей матеріалів на сантиметрових хвилях.

Дефектоскопія шаруватих конструкцій

Одним з основних напрямків механіки руйнування композитів слід вважати прогнозування тріщиностійкості, статичної і циклічної міцності композита. Більшість компо-

зитів створюється на основі високоміцних армуючих елементів і матриці, що володіє достатньо високим ступенем деформативності. При руйнуванні армуючого елемента або при пошкодженні межі розділу фаз відбувається перерозподіл напружень таким чином, що пошкодження локалізується у відносно малому обсязі. Завдяки цьому ефективна міцність композита в цілому практично не знижується, що є одним з його переваг у порівнянні з традиційними матеріалами. Схеми руйнування композитів, що враховують взаємодію між процесом накопичення мікропошкоджень і фінальним руйнуванням, наведені на рис. [1]. У початковому стані в композитах є початкові дефекти тієї ж природи, що і мікропошкодження. Після прикладання навантаження, включаючи експлуатаційне, відбувається або крихке руйнування зразка, або йде процес накопичення мікропошкоджень.

Дефектоскопія шаруватих конструкцій пов'язана в основному з визначенням дефектів технологічного профілю, однак дослідження експлуатаційних дефектів, а також дефектів, що виникають у процесі механічного оброблення, особливо для конструкцій багаторазового використання або тривалого зберігання, також є актуальними.

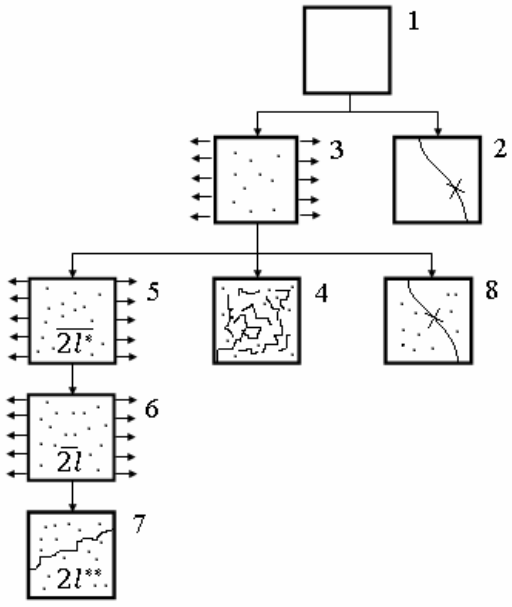


Рис. Схеми етапів руйнування композитів:
1 – початковий стан; 2 – крихке руйнування; 3 – накопичення мікропошкоджень; 4 – руйнування внаслідок втрати цілісності; 5 – утворення макроскопічної тріщини; 6 – зростання макроскопічної тріщини; 7 – фінальне руйнування в результаті зростання макроскопічної тріщини; 8 – крихке руйнування як результат накопичення мікропошкоджень; – характерний розмір зародкової тріщини; ** – критичне значення тріщини*

Технологія неруйнівного контролю конструкцій з шаруватих композитів визначається декількома параметрами, серед яких важливе місце займають габарити виробу, товщина силової оболонки, стан поверхні виробу та особливості технології виготовлення та оброблення. Контроль суцільності силової оболонки великого діаметра за технологією суттєво відрізняється від досліджень дефектів у виробах малого розміру. Оскільки проведення нерозривно вирішального контролю не гарантує якості всього обсягу виробів, такий контроль необхідний на стадії відпрацювання технології виготовлення для ідентифікації типів дефектів або у випадку, коли не існує інших методів контролю якості. Поряд з контролем якості вирішується і багато завдань по прогнозуванню властивостей і параметрів конструкції, а також щодо можливих причин відмови виробів при експлуатації. Оскільки методи неруйнівного контролю не є універсальними і кожен з них має свою область найбільш ефективного застосування, необхідно визначити головне спрямування

їх застосування: контроль виробів з певного матеріалу чи пошук дефектів певного виду. Для дефектоскопії шаруватих конструкцій можна застосовувати різні методи неруйнівного контролю, що базуються на певних фізичних явищах [1].

Магнітний метод. Визначає розсіювання магнітних полів різними дефектами в деталях будь-яких форм і розмірів феромагнітних матеріалів, які можуть суттєво змінити свої магнітні характеристики під впливом зовнішнього поля. Для матеріалів, що не володіють феромагнітними властивостями, цей метод контролю неприйнятний, тому для виробів з полімерних композиційних матеріалів він не використовується.

Електричний метод. Реєструє в контрольованому об'єкті електричне поле, створюване або безпосередньою дією на нього електричного поля, або опосередковано – за допомогою впливу збуреннями неелектричної природи. Як первинний інформативний параметр використовують електричні характеристики об'єкта контролю. Електричними методами можна визначати вміст компонентів у гетерогенних системах, вологість, ступінь полімеризації і старіння, поперечні розміри лінійно-протяжних діелектричних виробів, локалізацію провідних і непровідних включень у структурі шаруватого пакета.

Тепловий неруйнівний контроль. Виявляє теплові (температурні) поля контрольованого об'єкта. Температурне поле поверхні служить джерелом інформації про особливості теплопередачі, які, у свою чергу, залежать від наявності внутрішніх або зовнішніх дефектів: раковин, порожнин, тріщин, непроварів, інорідних включень і т. д. Основним інформаційним параметром цього методу є локальна різниця температур між дефектною і бездефектною областями об'єкта. Перепад температур на різних ділянках контрольованого об'єкта є функцією більшого числа факторів як внутрішніх, так і зовнішніх. Внутрішні фактори визначаються теплофізичними властивостями контрольованого об'єкта і дефекту, а також їх геометричними параметрами. До зовнішніх факторів належать характеристики процесу теплообміну на поверхні об'єкта контролю, потужність джерела нагрівання і швидкість його переміщення уздовж об'єкта. Знак перепаду залежить від співвідношення теплофізичних властивостей дефекту, виробу і досліджуваної поверхні. Методами теплового контролю можна виявити такі дефекти, як пропуски армуючих ниток у каркасах, порівняно великі сторонні включення. Однак ці методи не дозволяють виявляти дрібні структурні дефекти, оскільки геометрично роздільна здатність сучасної апаратури становить приблизно 0,5 мм.

Вихрострумовий метод. Аналізує взаємодію зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що створюються в електропровідних об'єктах контролю. Через відсутність електропровідних властивостей цей метод не застосовний для контролю виробів із шаруватих композиційних матеріалів [1; 3; 4].

Радіотехнічні методи (радіохвильовий і радіоспектроскопічний). Широко застосовуються для контролю якості виробів з полімерних композиційних матеріалів. Радіохвильовий метод базується на використанні явищ відображенні і загасанні радіохвилі, пов'язаних з наявністю дефектів у контрольованому виробі, радіоспектроскопічний – на використанні залежності резонансних явищ у матеріалах від їх складу, структури та в багатьох випадках – від форми виробу. Це дозволяє контролювати появу дефектів дуже малих розмірів, аж до декількох десятків міжатомних відстаней.

Оптичний метод. Аналізує взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом контролю. Інформаційними параметрами цього методу є просторово-часові розподіли його амплітуди, фази, поляризації і ступеня когерентності.

Метод інфрачервоної дефектоскопії. Отримав широке застосування. Заснований на відмінності теплопровідності у якісного і дефектного матеріалу. Він застосовується для виробів, що мають доступ як із зовнішнього боку, так і зсередини. Метод дозволяє ви-

значати такі дефекти у шаруватих композитах: порожнечі, відшарування, пори, тріщини, чужорідні включення, відхилення від заданої геометричної форми.

Акустичний метод. Реєструє параметри пружних коливань, що створюються у досліджуваному об'єкті. Він дозволяє контролювати суцільність композиційних матеріалів, якість зварних і клеєних з'єднань. Точність вимірювань становить від 3 до 8 % від еквівалентної або умовної чутливості, що задається еталонними відбивачами. Акустичні методи дуже критичні до форми контрольованих об'єктів (сферичні, конічні) невеликих розмірів. Нині для визначення міцності склопластикових корпусів тиску застосовуються методи продзвону, засновані на реєстрації та аналізі характерного потріскування матеріалу стінки корпусу при гідростатичному навантаженні.

Радіаційні методи. Засновані на взаємодії іонізуючого випромінювання з контрольованим об'єктом та реєстрації пройденого через об'єкт випромінювання. Залежно від способу детектування дефектоскопічної інформації розрізняють радіографічний, радіоскопічний і радіометричний методи контролю. У першому випадку радіаційне зображення контрольованого об'єкта перетворюється в радіографічний знімок. Радіаційна інтроскопія заснована на перетворенні радіаційного зображення контрольованого об'єкта у світлове зображення на екрані радіаційно-оптичного перетворювача. Радіометрична дефектоскопія перетворює радіаційне зображення в електричні сигнали, подальший аналіз яких реалізується сучасними методами. Найбільш здійсненим з усіх радіаційних методів є метод обчислювальної томографії. Основні переваги методу обчислювальної томографії полягають у тому, що зображення внутрішньої структури об'єкта відтворюється без накладення тіней, тому його чутливість до зміни щільності на порядок вище, ніж у традиційних методів радіаційного контролю.

Ультразвукова діагностика полімерних композиційних матеріалів

Найбільше застосування при контролі якості виробів з композиційних матеріалів знайшли методи ультразвукової дефектоскопії, які дозволяють виявити розриви армуючих волокон, бульбашки повітря і скупчення смоли при контролі виробів різноманітної форми.

Композиційні речовини схильні до старіння, тобто їх властивості (наприклад, пружні модулі) змінюються з часом під дією навантажень. Зміни модулів можуть досягати 20-25 % від їх початкових значень. Отже, для контролю процесу старіння необхідно правильно і з високою точністю вимірювати пружні характеристики композитів. Стандартні механічні методи дослідження пружних властивостей таких середовищ, однак малоефективні через свою громіздкість. Оскільки пружні модулі твердих тіл однозначно визначають фазові швидкості акустичних хвиль, для вимірювання модулів доцільно використовувати більш точні – ультразвукові методи.

Експериментально дослідження пружних характеристик композитів проводилися неодноразово. В роботі [4] використовувалася стандартна імерсійна техніка. Було показано, що в композитах такої структури при поширенні акустичної хвилі в напрямку k, існує одна квазіповздовжня і дві квазіпоперечні хвилі. Проте ця методика вимірювань, що використовує п'єзоелектричні джерела ультразвуку, володіє істотними недоліками.

Іммерсійна методика заснована на вимірюванні часової затримки між опорним звуковим сигналом, що пройшли іммерсійне середовище, і досліджуваним сигналом, що пройшли зразок. Тому необхідно, щоб імпульси квазіповздовжньої і квазіпоперечної хвиль були розділені в часі. Ця обставина, у свою чергу, обмежує мінімальну товщину зразків. Допустима товщина може змінюватися тільки в межах декількох міліметрів.

Можливе використання іншої методики вимірювань фазових швидкостей акустичних хвиль у композитах. Вона ґрунтується на вимірюванні коефіцієнта дворазового відображення УЗ хвиль від поверхні композита в прямому і зворотному (після відбиття від цилі-

ндричної стінки кювети) напрямках. Результати експериментів були представлені у вигляді залежностей коефіцієнтів відображення від кута падіння акустичних хвиль на поверхню зразків у різних перетинах композита і переліченим за цими даними залежностям фазових швидкостей УЗ хвиль у тих же осях і в тих же перерізах. Однак перші зі згаданих залежностей мали сильно порізану структуру, що можна було пояснити тільки великою помилкою проведених вимірювань. Крім того, зміна кутового спектра за рахунок віддзеркалення від циліндричної поверхні робить інтерпретацію результатів дворазового відображення ультразвуку від зразка неоднозначною. Зазначені проблеми можуть бути подолані з використанням лазерних джерел ультразвуку. Дослідження розповсюдження УЗ хвиль у композитах вироблялося при сфокусованому лазерному опроміненні поверхні [5]. Проте в цьому випадку можуть бути визначені тільки групові швидкості і розрахунок пружних модулів стає серйозною проблемою. Таким чином, для вирішення завдання дослідження поширення пружних хвиль у композитах з метою отримання повного набору пружних модулів і побудови адекватної механічної моделі таких середовищ необхідно більш точне вимірювання кутових залежностей фазових швидкостей УЗ хвиль у широкому діапазоні частот для зразків довільної товщини.

Внаслідок того, що типові пошкодження структури композита, такі як розриви волокон, мікротріщини, пори в з'єднанні, відшарування волокон від зв'язуючого і т. п. призводять до зміни загасання ультразвуку, одним з найбільш поширених методів неруйнівного контролю композитів є ультразвуковий. Для отримання надійної інформації про характер дефектів структури необхідні вимірювання спектральних характеристик у широкій смузі частот, тому що розсіювання ультразвуку на мікронеоднорідності відбувається тільки на довжинах хвиль, порівнянних з їх розмірами. Тому в більшості методів ультразвукового контролю використовується імпульсне випромінювання. Однак застосування традиційних п'єзоелектричних перетворювачів для генерації потужних широкосмугових зондувальних імпульсів утруднено передусім через низьку ефективність п'єзогенерації широкосмугових акустичних сигналів. Для отримання потужних широкосмугових ультразвукових імпульсів у методиках неруйнівних досліджень композитів пропонується використовувати лазерне термооптичне збудження звуку. За частотної залежності коефіцієнта загасання ультразвуку в досить широкому спектральному діапазоні можна оцінити характерні розміри неоднорідностей структури. Трансформація спектрів загасання ультразвуку в композитах при втомних зміни структури дає можливість оцінити його залишковий ресурс. З використанням таких джерел була запропонована й експериментально реалізована [4] методика широкосмугової акустичної спектроскопії неоднорідних конструкційних матеріалів. Ця методика дозволяє отримувати частотні залежності коефіцієнта загасання і швидкості ультразвукових хвиль у зразку в спектральному діапазоні імпульсів лазерного джерела ультразвуку та дослідити трансформацію цих залежностей при різних змінах структури зразків. Наприклад, було виявлено вплив втомних пошкоджень структури склопластикових композитів, що виникли при циклічних і статичних навантаженнях, на частотні залежності коефіцієнта загасання ультразвуку в спектральному діапазоні 1÷20 МГц. Отже, застосування в неруйнівному контролі та діагностиці композитів лазерного збудження ультразвуку є доцільним і перспективним.

Висновки. У статті розглянуто проблему неруйнуючої дефектоскопії виробів з композиційних матеріалів, зокрема під час виготовлення, експлуатації та механічного обробленя. Наведений аналіз існуючих на наш час методів контролю, зокрема тіньовий, імпедансний, велосиметричний, радіографічний, СВЧ-метод, метод емісії хвиль напружень, метод фотопружності покриттів. Велика увага при виробництві та обробленні конструкцій КМ приділяється тріщиностійкості, а також запобіганню розшарування матеріалу.

Дефектоскопія шаруватих конструкцій пов'язана в основному з визначенням дефектів технологічного профілю, однак дослідження експлуатаційних дефектів, а також дефектів, що виникають у процесі механічного оброблення, особливо для конструкцій багаторазового використання або тривалого зберігання, також є актуальними, бо накопичення мікропошкоджень може призвести до руйнування матеріалу, що значно знижує якість конструкції та її експлуатаційні властивості.

Для неруйнуючої дефектоскопії КМ застосовуються методи, інформативність яких залежить від товщини зразка, якості поверхні тощо. Деякі з наведених методів не застосовуються в композитах, через відсутність у них феромагнітних властивостей. Найбільш розповсюдженим нині є застосування ультразвукового контролю, подальше дослідження якого є надалі перспективним.

Список використаних джерел

1. *Буров А. Е.* Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов / А. Е. Буров, И. И. Кокшаров, В. В. Москвичев. – Новосибирск : Наука, 2003. – 176 с.

2. *Импульсная* акустическая спектроскопия с лазерным источником звука / А. А. Карабутов, М. П. Матросов, Н. Б. Подымова, В. А. Пыж // Акуст. журн. – 1991. – Т. 37 (2). – С. 311-321.

3. *Неразрушающие* методы и средства контроля качества изделий и конструкций из неметаллов. – Л. : ЛДНТП, 1982. – 87 с.

4. *Потапов А. И.* Неразрушающий контроль качества изделий из стеклопластиков / А. И. Потапов, Г. Л. Баранов. – Л. : ЛДНТП, 1970. – 46 с.

5. *Scott W. R.,* Gordon P. F. Ultrasonic spectral analysis for nondestructive testing of layered composite materials // J. Acoust. Soc. Am. – 1984. – Vol. 62 (1). – P. 108.

РОЗДІЛ ІІ. МЕХАНОХІМІЯ

УДК 621.3.05

А.Л. Приступа, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ЧАСТКОВИХ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕСЛІВСЬКИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ БЕЗДРОТОВІЙ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

А.Л. Приступа, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЧАСТИЧНЫХ ЕМКОСТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕСЛОВСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕ ЭНЕРГИИ

A.L. Prystupa, Candidate of Techical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

FEATURES OF CALCULATING THE PARTIAL CAPACITANCES FOR SIMULATION OF TESLA'S PROCESSES AT WIRELESS POWER TRANSMISSION

Представлено математичну модель для розрахунку енергетичних параметрів теслівських процесів при бездротовій передачі енергії. Вказано на особливості розрахунку часткових ємностей системи провідників. Показано доцільність розрахунку часткових ємностей для системи циліндричних провідників модернізованим методом Хоу.

Ключові слова: *бездротова передача енергії; рівняння Максвелла, часткові ємності.*

Представлена математическая модель для расчета энергетических параметров тесловских процессов при беспроводной передаче энергии. Указано на особенности расчета частичных емкостей системы проводников. Показана целесообразность расчета частичных емкостей для системы цилиндрических проводников модернизованным методом Хоу.

Ключевые слова: *беспроводная передача энергии; уравнение Максвелла, частичные емкости.*

Developed a mathematical model for calculating the energy parameters of Tesla's processes at wireless energy transmission. Is specified on features of calculating the partial capacitances of conductors. Is shown the expediency of calculating the partial capacitances of cylindrical conductors by the modernized method How.

Key words: *wireless transmission of energy, Maxwell's equations, partial capacities.*

Останнім часом із розвитком передових технологій відкривається багато сфер життєдіяльності людини, де необхідна передача енергії без проводів на порівняно невеликі відстані: для безконтактної підзарядки акумуляторів побутових електроприладів (мобільних телефонів, електробритов і т. п.), для безконтактної підзарядки акумуляторів різних пристроїв сучасної медицини (кардіостимулятори, пристрої для схуднення) тощо.

Існують різні способи здійснення бездротової передачі енергії: шляхом електромагнітної індукції, електромагнітного випромінювання, передача по спеціально створеному провідному каналі, резонансні методи тощо.

Бездротовий спосіб передачі енергії має такі основні переваги в порівнянні з провідним:

- відсутність елементів, які з'єднують джерело й приймач електричної енергії, а також конструкцій для їхнього кріплення та з'єднання;
- можливість передачі енергії герметичним об'єктам та у важкодоступні місця;
- можливість передачі енергії мобільним об'єктам.

У [1] було сформульоване суть терміна "теслівські процеси": це процеси, пов'язані з високими напругами та струмами високої частоти, при яких основну роль відіграють струми зсуву, розподілені у всьому навколишньому просторі. Для ефективного протікання теслівських процесів частота генератора повинна перебувати в межах від 20 кГц до 1 МГц. При більше низьких частотах ефективність передачі енергії невелика, а при збільшенні частоти вище 1 МГц збільшуються втрати на випромінювання, зменшуючи тим самим ККД теслівського процесу [1; 2].

Теслівські процеси характеризуються високими електричними й порівняно слабкими магнітними полями, що дає можливість використовувати такі системи там, де значна величина магнітної складової електромагнітного поля є неприпустимої, наприклад, у медицині. При резонансах їх інтенсивність різко зростає [2-3].

Слід зазначити, що термін "антена" при розгляді теслівських процесів відрізняється за змістом від прийнятого в радіотехніці. У теслівських процесах передача енергії здійснюється не за рахунок випромінювання радіохвиль. Тому передавальною (приймальною) антеною в теслівському колі виступає провідник будь-якої форми, що утворює часткові ємності з аналогічними провідниками-антенами приймача (передавача).

Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії за допомогою теслівських процесів можна проводити методами теорії поля, однак це значно ускладнює розрахунок. Для спрощення розрахунку можна скористатися методом часткових ємностей.

Базова схема бездротової передачі енергії за допомогою теслівських процесів представлена на рис. 1.

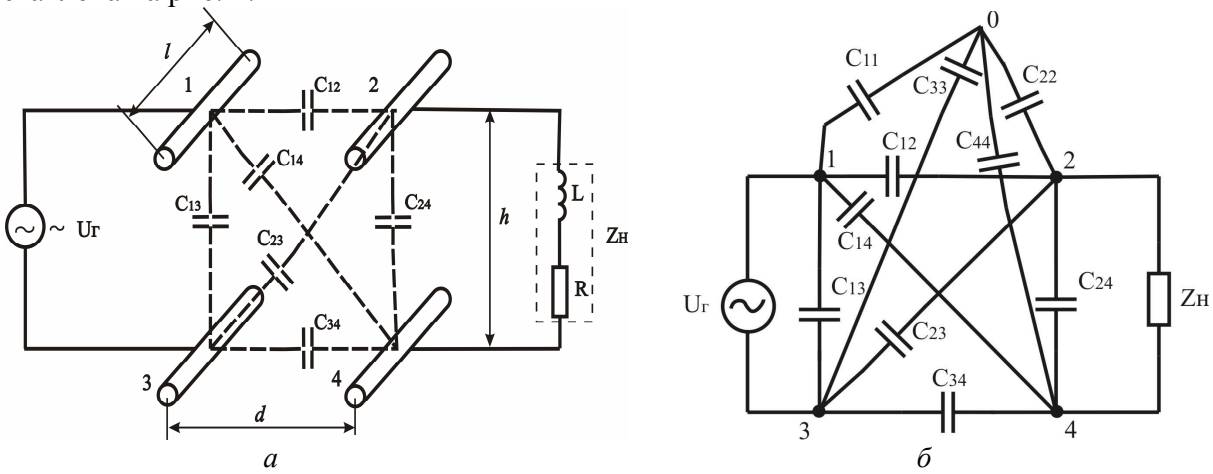


Рис. 1. Схема бездротової передачі енергії за допомогою теслівських процесів: а – базова схема бездротової передачі; б – еквівалентна схема заміщення

Для цієї схеми розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії можна проводити методом вузлових потенціалів.

$$\begin{cases} \phi_1 = 0 \\ \phi_2(y_{23} + y_{24} + y_{12} + y_{22}) - \phi_3 \cdot y_{23} - \phi_4 \cdot y_{24} - \phi_0 \cdot y_{22} = 0 \\ \phi_3 = U_\Gamma \\ \phi_4(y_{14} + y_{24} + y_{34} + y_{44}) - \phi_2 \cdot y_{24} - \phi_3 \cdot y_{34} - \phi_0 \cdot y_{44} = 0 \\ \phi_0(y_{11} + y_{22} + y_{33} + y_{44}) - \phi_2 \cdot y_{22} - \phi_3 \cdot y_{33} - \phi_4 \cdot y_{44} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} &y_{11} = j\omega \cdot C_{11}, \quad y_{22} = j\omega \cdot C_{22}, \quad y_{33} = j\omega \cdot C_{33}, \quad y_{44} = j\omega \cdot C_{44}, \\ &y_{12} = j\omega \cdot C_{12}, \quad y_{13} = j\omega \cdot C_{13}, \quad y_{14} = j\omega \cdot C_{14}, \quad y_{23} = j\omega \cdot C_{23}, \\ &y_{34} = j\omega \cdot C_{34}, \quad y_{24} = j\omega \cdot C_{24} + \frac{1}{R + j\omega \cdot L}, \end{aligned} \quad (2)$$

де C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{12}, C_{34}, C_{13}, C_{24}, C_{14}, C_{23} – часткові ємності середовища між антенами;

$R + j\omega \cdot L$ – параметри навантаження.

При передачі енергії на порівняно невеликі відстані між антенами впливом землі можна знехтувати й при розрахунку не враховувати.

Струм у навантаженні та активна потужність, що виділяється в навантаженні, відповідно дорівнюють

$$I_H = \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R + j\omega \cdot L}, \quad P_H = R \cdot \left| I_H \right|^2. \tag{3}$$

У [2-3] приведено результати досліджень впливу параметрів навантаження, джерела та навколишнього середовища на перебіг теслівського процесу бездротової передачі енергії. Зокрема було встановлено, що процес передачі є ефективним лише за наявності в колі навантаження резонансної індуктивності, а робочим режимом має бути режим близький до резонансу. На параметри резонансу вливає багато факторів: частота джерела; індуктивність навантаження; значення часткових ємностей між провідниками.

Часто змінювати параметри навантаження, зокрема значення індуктивності, складно, наприклад, при імплантації приймального блоку. Виконання джерела з можливістю регулювання частоти в широкому діапазоні призводить до зменшення його надійності та збільшення вартості. Тому задача точного визначення часткових ємностей на етапі проектування системи бездротової передачі енергії є дуже важливою.

Часткові ємності між антенами дуже сильно залежать від діелектричної проникності середовища, геометричних розмірів і форми антен, а також їхнього взаємного розташування.

Задача розрахунку часткових ємностей у системі провідників може бути вирішена на основі розрахунку електростатичного поля розглянутої системи. Для розрахунку електростатичного поля, використовуючи групи формул Максвелла, необхідно знати розподіл потенціалу та заряду провідників, що не завжди можливо. Тому в тих випадках, коли розрахунок електростатичного поля не може бути виконано, використовуються спеціальні методи розрахунку ємності, засновані на встановленні точного або наближеного зв’язку заряду провідника безпосередньо з потенціалом його поверхні, серед яких виділяють методи безпосереднього визначення ємності та допоміжні методи та оцінки [4].

Для провідників простої форми (циліндричні проводи, сферичні антени тощо) розрахунок часткових ємностей доцільно виконувати модифікованим методом середніх потенціалів (метод Хоу), що заснований на завданні фіктивного розподілу заряду по поверхні або в об’ємі тіл, що заміняють провідники. При цьому поверхні кожного з тіл приписується постійний потенціал, рівний середньому арифметичному значень потенціалу у всіх точках поверхні тіла ($U=U_{CP}$) [5].

У традиційному методі Хоу є допущення про те, що заряд розподілений по поверхні тіла рівномірно. Реальний розподіл заряду уздовж провідника буде відрізнятися від рівномірного, що вносить додаткову похибку в розрахунок часткових ємностей. З розвитком обчислювальної техніки питання складності математичних розрахунків стоять не так гостро, тому в [5] для збільшення точності запропоновано задатися більше складним законом розподілу заряду.

Так, для провідників циліндричної форми можна використовувати закон розподілу заряду вздовж поверхні провідника, що визначається рівнянням

$$\tau(x) = \tau_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot x^{2 \cdot i}, \tag{4}$$

де τ_0 – лінійна густина заряду в центрі провідника; b_i – коефіцієнти апроксимації; n – кількість членів ряду.

Оскільки розподіл заряду симетричний щодо центру провідника, то при виборі функції розподілу враховуються тільки парні ступені x.

Для знаходження коефіцієнтів апроксимації для закону розподілу заряду необхідно скористатися умовою рівності потенціалу в будь-яких точках на поверхні провідника.

$$\begin{cases} \varphi(0)-\varphi(x_1)=0; \\ \varphi(x_1)-\varphi(x_2)=0; \\ \vdots \\ \varphi(x_{n-1})-\varphi(x_n)=0. \end{cases} \quad (5)$$

Використання сучасних комп'ютерних математичних пакетів дозволяє досить швидко знайти розподіл заряду вздовж поверхні провідника навіть при великій кількості числа членів ряду *n*. Після визначення закону розподілу заряду вздовж поверхні провідника визначаються середні значення заряду та потенціалів кожного провідника в системі передачі, знаючи які, знаходять потенціальні коефіцієнти

$$\alpha_{ij}=-\frac{\varphi_{cp\ ij}}{Q_{cp\ i}}; \quad (6)$$

та формують першу групу формул Максвелла

$$\begin{aligned} U_1&=\alpha_{11}\cdot Q_1+\alpha_{12}\cdot Q_2+\ldots+\alpha_{1n}\cdot Q_n; \\ U_2&=\alpha_{21}\cdot Q_1+\alpha_{22}\cdot Q_2+\ldots+\alpha_{2n}\cdot Q_n; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ U_n&=\alpha_{n1}\cdot Q_1+\alpha_{n2}\cdot Q_2+\ldots+\alpha_{nn}\cdot Q_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Значення часткових ємностей визначається по формулах [6]

$$C_{ik}=-\frac{\Delta_{ik}}{\Delta}; \quad C_{kk}=\sum_{j=1}^{n}\frac{\Delta_{kj}}{\Delta}, \quad (8)$$

де Δ – визначник матриці потенційних коефіцієнтів; Δ_{ik} – алгебраїчне доповнення.

У результаті даного підходу вдається підвищити точність визначення часткових ємностей. У цьому можна пересвідчитись порівнюючи розподіл потенціалу вздовж поверхні провідника (рис. 2).

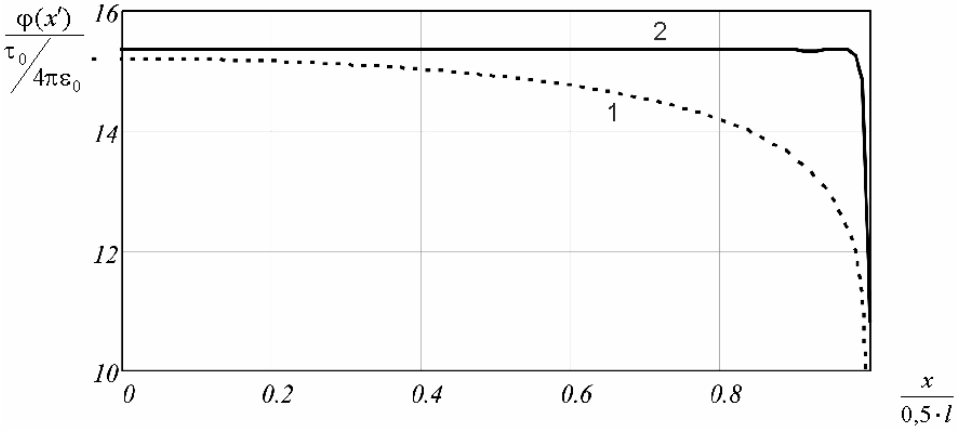


Рис. 2. Розподіл напруги вздовж провідника:
1 – *при традиційному методі Хоу, 2 – при модифікованому методі Хоу*

Як видно з рис. 2, розподіл напруги при модифікованому методі Хоу більше відповідає реальному.

Висновки. Виділено сфери життєдіяльності людини, у яких існує потреба в бездротовій передачі енергії, і запропонована базова схема для здійснення такої передачі.

Описано математичну модель для розрахунку енергетичних параметрів при бездротовій передачі. Вказано на особливості розрахунку часткових ємностей системи провідників.

Список використаних джерел

1. *Пентегов И. В.* К теории тесловских процессов зарядки емкосных накопителей энергии / И. В. Пентегов // Электричество. – 1996. – № 6. – С. 42-47.

2. *Пентегов И. В.* Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов бытовых электрических устройств / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка. Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч. 2.– С. 16-21.

3. *Пентегов И. В.* О возможности осуществления бесконтактной подзарядки аккумуляторов имплантированных электростимуляторов / И. В. Пентегов, И. В. Волков, А. Л. Приступа // Технічна електродинаміка. Тем. вип. „Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 5.– С. 109-113.

4. *Иоссель Ю. Я.* Расчет электрической ёмкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 288 с.

5. *Пентегов І. В.* Усовершенствование метода Хоу для расчета частичных емкостей системы проводников / І. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Електротехніка і Електромеханіка. – 2012. – № 1. – С. 57-60.

6. *Шимони К.* Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М. : Мир, 1964. – 775 с.

УДК 532.528

В.В. Анісімов, аспірант
П.П. Єрмаков, д-р техн. наук
ДВНЗ "Український державний хіміко-технологічний університет", м. Дніпропетровськ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КАВІТАЦІЇ В ЗАНУРЕНОМУ СОПЛІ

В.В. Анисимов, аспирант
П.П. Ермаков, д-р техн. наук
ГВУЗ "Украинский государственный химико-технологический университет", г. Днепропетровск, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ В ПОГРУЖЕННОМ СОПЛЕ

V.V. Anisimov, post-graduate student
P.P. Yermakov, Doctor of Technical Sciences
SHED USUCT, Dnipropetrovsk, Ukraine

INVESTIGATION OF CAVITATION PROCESS IN SUBMERGED NOZZLE

Розглянуто вплив геометричних параметрів кавітаційного сопла зануреного типу на інтенсивність кавітації в ньому. Представлено результати експериментальних досліджень взаємозв'язку між довжиною, діаметром вузької частини сопла та інтенсивністю кавітації. Результати досліджень підтверджено за допомогою аналізу дисперсності емульсії, отриманої з використанням досліджуваних сопел.

Ключові слова: *кавітація, кавітаційне сопло, геометричні параметри, інтенсивність кавітації, емульгування.*

Рассмотрено влияние геометрических параметров кавитационного сопла погруженного типа на интенсивность кавитации в нем. Представлены результаты экспериментальных исследований взаимосвязи между длиной, диаметром узкой части сопла и интенсивностью кавитации. Результаты исследований подтверждены путем анализа дисперсности эмульсии, полученной с использованием исследуемых сопел.

Ключевые слова: *кавитация, кавитационное сопло, геометрические параметры, интенсивность кавитации, эмульгирование.*

The influence of the geometric parameters of the submerged cavitation nozzle on cavitation intensity in it is considered. Results of experimental studies of the relationship between the length, diameter of the nozzle narrow part and the cavitation intensity are presented. Studies are confirmed by analyzing the dispersion of the emulsion prepared using the investigated nozzles.

Key words: *cavitation, cavitation nozzle, the geometrical parameters, the intensity of cavitation, emulsification.*

Постановка проблеми. Кавітація – явище виникнення в рідині парових, газових або парогазових бульбашок із зародків під дією локальних низьких тисків з можливим наступним їх схлопуванням.

Вперше явище кавітації було теоретично передбачене Рейнольдсом. На практиці ж людство вперше зіткнулося з кавітацією в кінці XIX століття при випробуваннях швид-

кісних морських судів [1; 2] як з суто негативним явищем, яке призводило до ерозійного руйнування деталей машин, виникнення шумів та вібрацій.

Починаючи з середини XX століття, отримав розвиток напрямок використання кавітації для інтенсифікації процесів хімічної технології.

На сьогодні кавітаційні технології знайшли широке застосування в багатьох галузях хімічної промисловості, зокрема в загальній хімічній, харчовій, нафтохімічній промисловостях. Найбільш поширеним застосуванням кавітації є інтенсифікація процесів тонкого перемішування, диспергування, емульгування, абсорбції [2; 3]. Також за допомогою кавітації інтенсифікують або навіть ініціюють протікання хімічних реакцій [4].

Широке застосування кавітації в промисловості обумовлює необхідність у подальших наукових дослідженнях цього явища як з фундаментальної, так і з прикладної сторони.

Нині існує значний теоретичний та практичний дослідницький матеріал, що стосується кавітації в рідині. Зокрема, в теоретичній сфері існує велика кількість математичних моделей руху кавітаційної бульбашки. Загальноприйнятим рівнянням, що застосовується для описання руху кавітаційної бульбашки, є рівняння Релея-Плесета [5]. Проте на сьогодні немає жодної математичної моделі, яка б одночасно враховувала всі фактори, що впливають на кавітацію і давала б абсолютно точне описання процесу.

Тому актуальними є експериментальні дослідження процесу кавітації. Зокрема, актуальним є визначення таких умов проходження процесу кавітації, при яких би цей процес відбувався з найбільшою інтенсивністю при найменших енерговитратах.

Об’єкти та методики досліджень. Дослідження проводились на експериментальній струменевій кавітаційній установці (рис. 1).

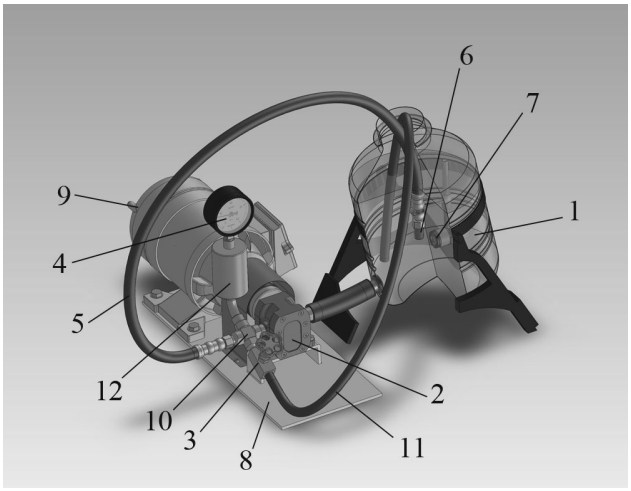


Рис. 1. Загальний вигляд кавітаційної установки:
1 – буферна ємність; 2 – насос шестеренний; 3 – вентиль; 4 – манометр; 5 – напірний трубопровід; 6 – кавітаційне сопло; 7 – датчик; 8 – плита; 9 – двигун; 10 – розподільчий вузол; 11 – трубопровід скидання; 12 – компенсатор тиску

Установка працює таким чином. Рідина з буферної ємності *1* всмоктується шестеренним насосом *2*, з якого під тиском, що задається вентилем *3* та вимірюється манометром *4*, подається через напірний трубопровід *5* до кавітаційного сопла *6*. У кавітаційному соплі *6* рідина значно прискорюється і в ній починають зростати кавітаційні бульбашки. Після виходу з сопла кавітаційні бульбашки схлопуються, а імпульси тиску, що при цьому виникають, фіксуються датчиком *7* на базі п’єзоелектричного елемента та передаються на комп’ютер у вигляді осцилограми. Такі акустичні дослідження дозволяють проводити порівняно велику кількість дослідів і, таким чином, отримати повну інформацію про досліджуваний процес.

За амплітудою коливань в осцилограмі оцінюється інтенсивність кавітації в соплі.

Після виходу з сопла рідина певний проміжок часу знаходиться в буферній ємності *1*, при цьому перемішуючись, після чого знову потрапляє до шестеренного насосу *2* через всмоктувальний патрубок. Таким чином здійснюється багатократне оброблення рідини.

Як основний об'єкт дослідження обрано кавітаційне сопло зануреного типу, ескіз якого наведений на рис. 2.

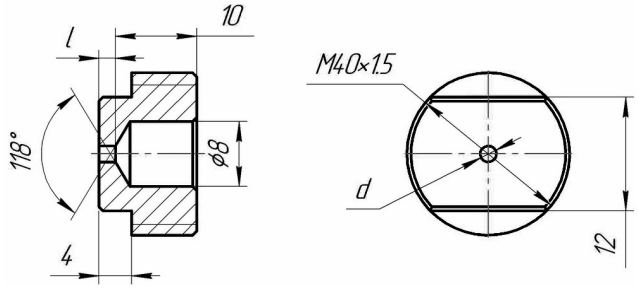


Рис. 2. Ескіз кавітаційного сопла

Слід зазначити, що у вищенаведеному соплі відсутній вихідний дифузор, що є характерним для типових кавітаційних сопел. Усунення вихідного дифузора виконано з позиції відкидання впливу зайвих факторів, зокрема довжини та кута розкриття дифузора, на інтенсивність кавітації в соплі.

Основною метою цього дослідження є вивчення впливу довжини вузької частини *l* кавітаційного сопла на інтенсивність кавітації при різних діаметрах *d* сопла (рис. 2).

Для підтвердження отриманих експериментальних даних акустичних досліджень та як приклад практичного застосування отриманих результатів використовували оптичні дослідження отриманої емульсії. Інтенсивність процесу емульгування оцінювалась, виходячи з розмірів часток мастила у воді в отриманій емульсії. Оптичні дослідження проводились на оптичному мікроскопі Epiquant.

Як робоча рідина під час проведення акустичних досліджень використовувалась суміш води та 0,7 об'ємн. % змащувально-охолоджувальної рідини СОЖ-Р (ТУ У 24.6-32038150-001-2003). Така робоча рідина за властивостями максимально наближена до води, але не викликає корозії.

Як робоча рідина під час проведення оптичних досліджень використовувалась суміш води з 2,5 об'ємн. % індустріального мастила І-40 (ГОСТ 20799-88).

Викладення основного матеріалу. Проведено акустичні дослідження впливу довжини вузької частини сопла *l* на інтенсивність кавітації. Дослідження проводились з використанням ряду сопел з різними довжинами їх вузької частини (1, 2, 5, 7 та 10 мм) (рис. 2). Крім довжини сопла, як аргумент взято швидкість рідини у вузькій частині сопла, яка змінювалась у межах від 24 до 50 м/с. Введення швидкості рідини як другого аргументу викликано необхідністю визначення, як буде змінюватись оптимальна довжина вузької частини сопла (тобто така, при якій кавітація найбільш інтенсивна) при зміні швидкості руху рідини в соплі. На цьому етапі діаметр сопла обраний сталим і дорівнює 2 мм. Кількість паралельних дослідів становить 5.

За результатами проведених досліджень отримано графічну залежність між довжиною вузької частини сопла, швидкістю рідини та інтенсивністю кавітації в цьому соплі (рис. 3).

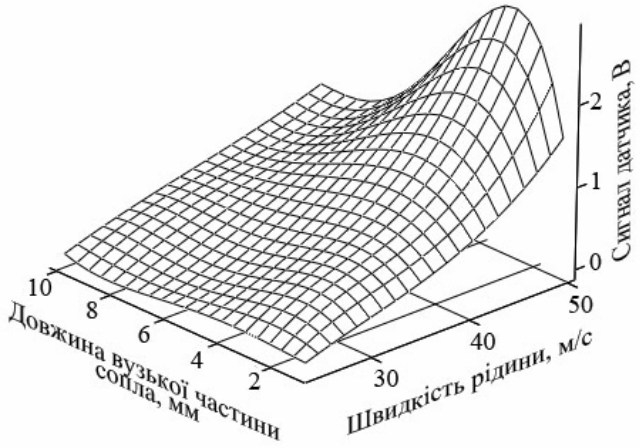


Рис. 3. Графік залежності сигналу датчика від довжини вузької частини сопла та швидкості рідини

Також отримано математичну залежність, що апроксимує цю поверхню відклику (рис. 3), у вигляді такого полінома:

$$U(\mathrm{v},l)=a_1\cdot l+a_2\cdot \mathrm{v}+a_3\cdot l\cdot \mathrm{v}^2+a_4\cdot l^2\cdot \mathrm{v}+a_5\cdot l\cdot \mathrm{v}^3+a_6\cdot l^3\cdot \mathrm{v}+$$
$$+a_7\cdot l^4\cdot \mathrm{v}+a_8\cdot l^2+a_9\cdot l^3+a_{10}\cdot l^4+a_{11}\cdot \mathrm{v}^2+a_{12}\cdot \mathrm{v}^3+a_{13}\cdot l^2\cdot \mathrm{v}^2+ \quad (1)$$
$$+a_{14}\cdot l^2\cdot \mathrm{v}^3+a_{15}\cdot l^3\cdot \mathrm{v}^2+a_{16}\cdot l^3\cdot \mathrm{v}^3+a_{17}\cdot l^4\cdot \mathrm{v}^2+a_{18}\cdot l^4\cdot \mathrm{v}^3+$$
$$+a_{19}\cdot l\cdot \mathrm{v}+a_{20},$$

де U – величина сигналу датчика, В; v – швидкість рідини у вузькій частині сопла, м/с; l – довжина вузької частини сопла, мм; $a_{1..20}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Чисельні значення коефіцієнтів рівняння регресії наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Чисельні значення коефіцієнтів рівняння регресії

Коефіцієнт	Значення	Розмірність	Коефіцієнт	Значення	Розмірність
a_1	-31,5	В/мм	a_{11}	0.0494	$В\cdot(с/м)^2$
a_2	-1,69	$В\cdot(с/м)$	a_{12}	$-4{,}67\cdot10^{-4}$	$В\cdot(с/м)^3$
a_3	-0,0824	$В\cdot(с/м)^2$/мм	a_{13}	0,0292	$В\cdot(с/м)^2/мм^2$
a_4	-1,01	$В\cdot(с/м)/мм^2$	a_{14}	$-2{,}76\cdot10^{-4}$	$В\cdot(с/м)^3/мм^2$
a_5	$7{,}91\cdot10^{-4}$	$В\cdot(с/м)^3$/мм	a_{15}	$-3{,}72\cdot10^{-3}$	$В\cdot(с/м)^2/мм^3$
a_6	0,13	$В\cdot(с/м)/мм^3$	a_{16}	$-3{,}48\cdot10^{-5}$	$В\cdot(с/м)^3/мм^3$
a_7	$5{,}55\cdot10^{-4}$	$В\cdot(с/м)/мм^4$	a_{17}	$1{,}58\cdot10^{-4}$	$В\cdot(с/м)^2/мм^4$
a_8	11,3	$В/мм^2$	a_{18}	$1{,}46\cdot10^{-6}$	$В\cdot(с/м)^3/мм^4$
a_9	-1,46	$В/мм^3$	a_{19}	2,83	$В\cdot(с/м)$/мм
a_{10}	0,0628	$В/мм^4$	a_{20}	18,5	В

З графіка (рис. 3) можна зробити такі висновки:

– інтенсивність кавітації, що оцінена через величину сигналу датчика, монотонно збільшується при збільшенні швидкості рідини у всіх досліджуваних соплах;

– залежність інтенсивності кавітації від довжини вузької частини сопла має екстремальний характер;

– найбільша інтенсивність кавітації спостерігається в діапазоні довжин вузької частини сопла від 2 до 5 мм і, за даними апроксимації, досягає екстремуму при довжині 3 мм. Таку довжину можна вважати оптимальною;

– оптимальна довжина вузької частини сопла не змінюється при зміні швидкості рідини в соплі принаймні в досліджуваному діапазоні швидкостей.

На думку авторів, екстремальний характер залежності інтенсивності кавітації від довжини вузької частини сопла пояснюється таким чином. При малій довжині вузької частини сопла зона зниженого тиску в ній відповідно має малі розміри. Кавітаційна бульбашка, що потрапляє в таку зону зниженого тиску, просто не встигає вирости до розміру, який забезпечує інтенсивне її схлопування. У разі збільшення довжини сопла все більшого значення набувають ефекти від тертя рідини об стінки каналу. При цьому вакуум, що є рушійною силою росту кавітаційних бульбашок, зменшується і ріст бульбашок уповільнюється.

Проведені дослідження дещо висвітлюють процеси, що мають місце у вузькій частині кавітаційного сопла та дозволяють вибрати таку довжину вузької частини кавітаційного сопла, при якій інтенсивність кавітації є найбільшою. Проте отримані дані, по-перше, є досить неточними, оскільки отримані завдяки апроксимації на досить великому проміжку між найближчими експериментально дослідженими довжинами вузьких частин, рівними 2 та 5 мм. По-друге, отримані результати дійсні тільки для сопла з діаметром вузької частини 2 мм, які використовувались під час проведення експериментів. Тому, базуючись на отриманих результатах, проведено дослідження в більш вузькому діапазоні довжин вузької частини сопла, метою яких є більш точно визначити її оптимальне значення та для сопел з різними діаметрами вузької частини з метою розширити можливості екстраполяції та практичного використання результатів досліджень.

Враховуючи раніше отриманий висновок про те, що швидкість рідини не впливає на оптимальність сопла, наступні дослідження проводились при постійній швидкості рідини v=32 м/с. Досліджувались кавітаційні сопла з діаметром вузької частини, що дорівнює 1; 1,5; 2; 2,5 та 3 мм. Відношення довжини вузької частини до її діаметра (в подальшому відносна довжина) обрано відповідно 0,75; 1; 1,25; 1,5 та 1,75. Винятком є сопла з діаметром вузької частини 3 мм, де додатково досліджено 2 насадки з відносною довжиною 2 та 2,25. Інші умови аналогічні.

За результатами проведених досліджень отримано графічну залежність між довжиною вузької частини сопла та інтенсивністю кавітації при різних діаметрах вузької частини (рис. 4).

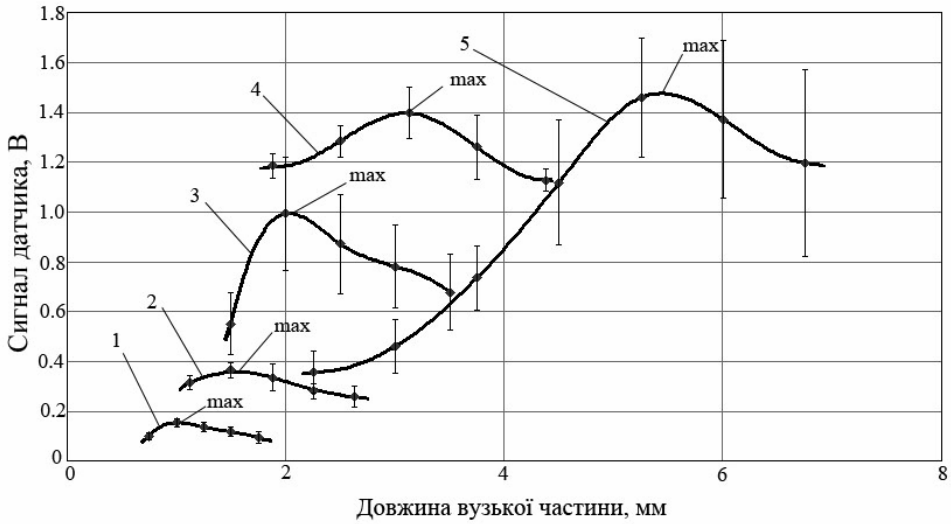


Рис. 4. Залежність сигналу датчика від довжини вузької частини кавітаційного сопла для різних діаметрів сопла:
1 – діаметр 1,0 мм; 2 – діаметр 1,5 мм; 3 – діаметр 2,0 мм; 4 – діаметр 2,5 мм; 5 – діаметр 3,0 мм

З рис. 4 видно, що для будь-якого досліджуваного діаметра вузької частини сопла спостерігається максимум інтенсивності кавітації при певній оптимальній довжині соп-

ла. Причому цей максимум зі збільшенням діаметра вузької частини сопла зміщується в бік більшої її довжини.

Математична залежність, що апроксимує криві на рис. 4, має такий вигляд:

$$U(l) = a_5 \cdot l^5 + a_4 \cdot l^4 + a_3 \cdot l^3 + a_2 \cdot l^2 + a_1 \cdot l + a_0, \quad (2)$$

де U – величина сигналу датчика, В; l – довжина вузької частини сопла, мм; $a_{1..5}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Чисельні значення коефіцієнтів при членах поліному регресії для кожного діаметра вузької частини сопла наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Чисельні значення коефіцієнтів рівнянь регресії

Коефіцієнт	Числове значення для різних діаметрів вузької частини, мм					Розмірність
	1	1,5	2	2,5	3	
a_0	-2,361	-0,591	-19,677	11,423	-13,105	В
a_1	7,826	1,533	32,344	15,104	18,73	В/мм
a_2	-8,923	-0,787	-18,554	7,981	-10,055	В/мм^2
a_3	4,423	0,124	4,627	-1,78	2,581	В/мм^3
a_4	-0,8125	0	-0,4261	0,1421	-0,312	В/мм^4
a_5	0	0	0	0	0,01427	В/мм^5

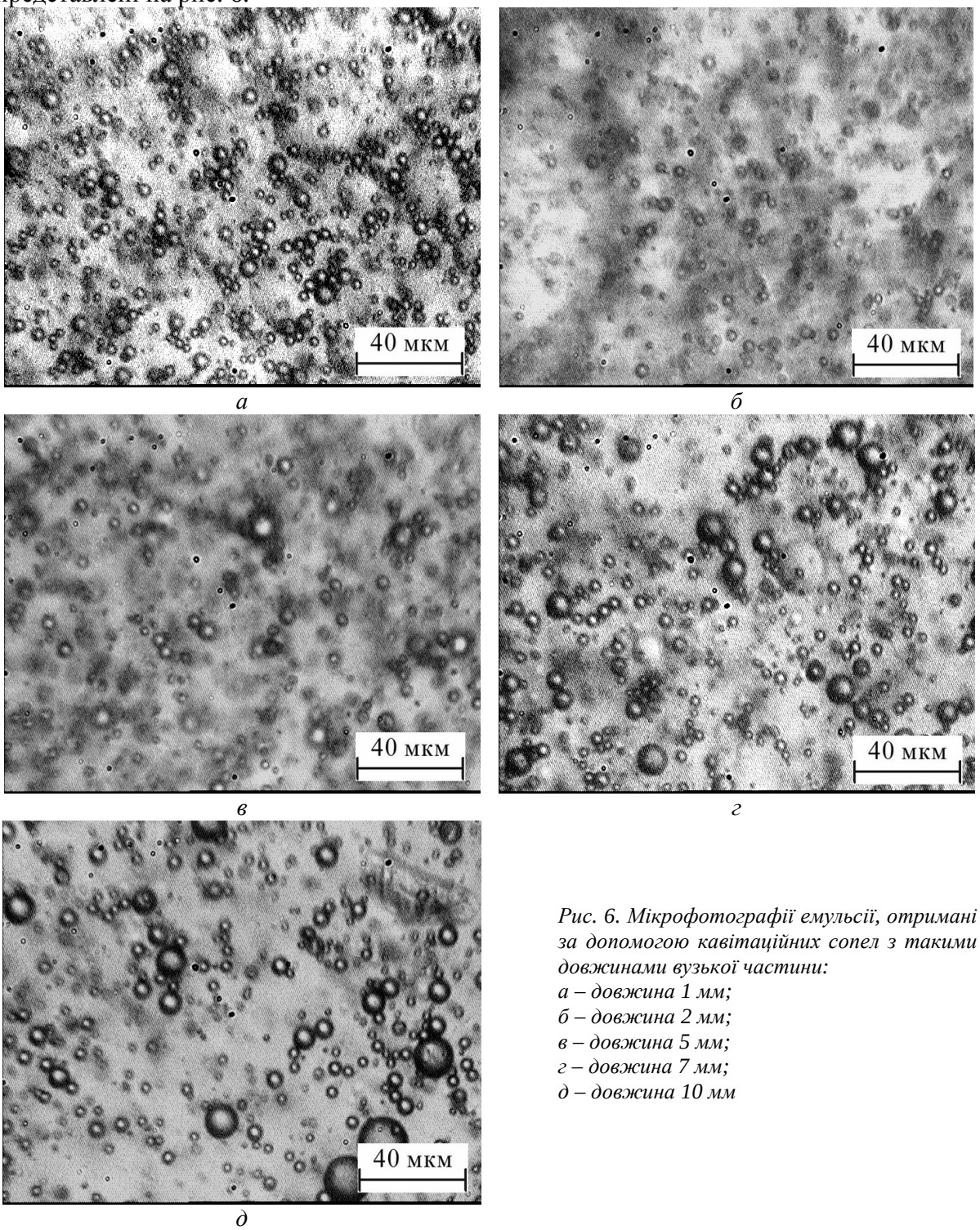
При більш глибокому аналізі поведінки максимумів величини сигналу датчика видно, що для діаметрів від 1 до 2 мм (криві 1-3 на рис. 4) спостерігається близька до лінійної залежність оптимальної довжини вузької частини сопла від його діаметра. Відповідно, при переході до відносної довжини оптимальна довжина сопла при цих діаметрах є константою і дорівнює одному діаметру сопла. Під час збільшення ж діаметра кавітаційного сопла ця величина нелінійно збільшується. Це добре видно з графіка оптимальних довжин сопла (рис. 5).

Рис. 5. Графік оптимальних відносних довжин вузької частини кавітаційного сопла

Таким чином, з рис. 5 видно, що при будь-якому діаметрі вузької частини сопла однозначно існує певна оптимальна його довжина, при якій інтенсивність кавітації в соплі є максимальною.

Для підтвердження отриманих результатів проведено дослідження впливу довжини вузької частини кавітаційного сопла на процес емульгування. Для проведення оптичних досліджень обрано набір кавітаційних сопел з діаметром 2 мм та довжинами 1, 2, 5, 7 і 10 мм, що використовувався під час випробувань, представлених на рис. 3. Експерименти проводились при швидкості рідини у вузькій частині сопла, рівній 32 м/с. Тривалість одного досліду становила 1 хв. Такий проміжок часу обумовлений тим, що під час проведення попередніх досліджень виявлено, що після цього періоду часу досягається основний ефект від емульгування і розміри часток мастила більше суттєво не зміню-

ються. Мікрофотографії, отримані за допомогою різних кавітаційних сопел емульсії, представлені на рис. 6.



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 6. Мікрофотографії емульсії, отримані за допомогою кавітаційних сопел з такими довжинами вузької частини:
а – довжина 1 мм;
б – довжина 2 мм;
в – довжина 5 мм;
г – довжина 7 мм;
д – довжина 10 мм

Як видно з рис. 6, найменші розміри часток мастила (середній діаметр частинки менше 5 мкм) спостерігаються на рис. 6, *б*, що свідчить про найбільшу якість отриманої емульсії і, відповідно, найбільшу інтенсивність кавітації при цій довжині вузької частини сопла. Ці дані добре корелюються з рис. 3, де під час використання цієї довжини кавітаційного сопла спостерігаються принаймні близькі до максимальних значення величини сигналу датчика. Під час відхилення довжини сопла від оптимальної спостерігається збільшення розмірів часток мастила (рис. 6, *а*, *в*, *г*, *д*) і, відповідно, погіршення якості емульсії.

Таким чином, отримані результати акустичних досліджень підтверджуються експериментально під час дослідження процесу емульгування індустріального мастила у воді. Крім того, виявлено, що за допомогою лише кавітаційного оброблення, при правильно підібраних її умовах, можна швидко отримувати дрібнодисперсну емульсію без застосування жодних емульгаторів. Під час їх використання, вірогідно, буде можливість отримати ще більш якісну емульсію. Проте це є окремою темою для досліджень.

Висновки і пропозиції. Геометричні параметри кавітаційного сопла суттєво впливають на процес кавітації в ньому. Виявлено, що існують певні оптимальні параметри сопла, при яких інтенсивність кавітації буде найбільша. Досліджено вплив довжини вузької частини сопла на інтенсивність кавітації в ньому і виявлено оптимальні її значення для різних діаметрів вузької частини сопла. Отримані результати підтверджено під час аналізу процесу емульгування. Також намічено можливі способи практичного використання результатів проведених досліджень.

Список використаних джерел

1. *Пирсол И.* Кавитация / И. Пирсол. – М. : Мир, 1975. – 95 с.
2. *Reynolds O.* The causes of racing of the engines of screw steamers, investigated theoretically and by the experiment / O. Reynolds. – Tr. Inst. Naval Arch. – 1873. – V14 Sc. Papers, 1, 56-57.
3. *Рождественский В. В.* Кавитация / В. В. Рождественский. – Л. : Судостроение, 1977. – 247 с.
4. *Смородов Е. А.* Физика и химия кавитации / Е. А. Смородов, Р. Н. Галиахметов, М. А. Ильгамов. – М. : Наука, 2008. – 228 с.
5. *Luca d'Agostino.* Fluid dynamics of cavitation and cavitating turbopumps / Luca d'Agostino, Maria Vittoria Salvetti. – SpringerWienNewYork. – 2007. – 351 p.

УДК 662:66.0

Ю.В. Радич, магістрант
Т.Б. Шилович, канд. техн. наук
Т.В. Лазарєв, аспірант
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПІРОЛІЗІ ТОРФУ

Ю.В. Радич, магистрант
Т.Б. Шилович, канд. техн. наук
Т.В. Лазарев, аспирант
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ТОРФА

Y.V. Radych, MA student
T.B. Shylovych, Candidate of Technical Sciences
T.V. Lazariev, graduate student
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES BY PYROLYSIS OF PEAT

Проаналізовано хімічний склад торфу і з'ясовано, що середній елементний склад органічної маси торфу залежить від глибини його залягання та ступеня розкладу. Експериментально досліджено динаміку виходу піролізного газу і напівкоксу з торфу в процесі його термообробки.

Ключові слова: *торф, піроліз, напівкокс, процес карбонізації.*

Проанализировано химический состав торфа и выяснено, что средний элементный состав органической массы торфа зависит от глубины его залегания и степени разложения. Экспериментально исследовано динамику выхода пиролизного газа и полукокса из торфа в процессе его термообработки.

Ключевые слова: *торф, пиролиз, полукокс, процесс карбонизации.*

The chemical composition of peat was analyzed and as a result average elemental elemental composition was found that depends on organic matter of peat depth, occurrence and decomposition state. The dynamics of pyrolysis gas and coking peat were analyzed in the process of the heat treatment.

Key words: *peat, pyrolysis, semicoke, the process of carbonization.*

Вступ. Торф у природному стані – це дуже зволожена, зольна суміш різних продуктів розкладу рослин в умовах вологого безповітряного середовища. Торф відноситься до молодих викопних палив і знаходиться за своїми енергетичними показниками між деревиною та бурим вугіллям. Хімічний склад торфу на горючу масу практично не відрізняється від деревини. Середній елементний склад органічної маси торфу залежить від глибини його залягання, ступеня розкладу та ін. і має приблизно такі усереднені показники (табл. 1) [1].

Таблиця 1

Середній елементний хімічний склад торфу

C, %	H, %	O, %	N, %	S, %
52–64	5–6	30–39	1–4	0–1

Зі збільшенням глибини залягання торфу ступінь його розкладу і вміст вуглецю та азоту в органічній масі підвищується, а водню та кисню, навпаки, зменшується.

Торф'яні поклади майже не містять сірку. Так, у верховому торфі її вміст приблизно становить 0-0,4 %, а у низинному – 0,2-1 %. Вміст летучих речовин від 68 до 76 %. Зольність верхового торфу знаходиться в межах 1-6 %, а низинного 6-20 %. Торф з малим вмістом золи, але з меншою температурою плавлення мало придатний для процесів піролізного оброблення, а з великим вмістом золи і високою температурою її плавлення навпаки – більш придатний.

Для зменшення вологовмісту торфу застосовується його сушіння. Сушіння торфу в природних умовах не завжди є можливим, а штучне сушіння потребує додаткових енергетичних витрат. Транспортування кускового торфу завдяки значним втратам дрібної фракції не є ефективним. Тому брикетований торф має певні переваги над кусковим, що проявляються у більш високій механічній міцності, що майже виключає наявність дрібної фракції, яка втрачається при транспортуванні, у постійній вологості та у більш високому значенні нижчої робочої теплоти згоряння – до 22 МДж/кг.

На підставі проведеного аналізу властивостей та технічних характеристик торфу як палива, можна сказати, що доцільно використовувати торф з середніми показниками, представленими у табл. 2.

Таблиця 2

Параметри торфу

Показник	**Значення**
Абсолютна максимальна вологість, %	до 30
Максимальний вміст золи, %	до 10-12
Мінімальна температура плавлення золи, °С	1200
Мінімальний ступінь розкладу, %	30
Максимальний вміст сірки (загальної), %	0,4-0,5
Максимальний розмір шматків, мм	60-70

Піроліз – це термічний розклад (деструкція) органічних і багатьох неорганічних сполук [1]. У вузькому розумінні – розклад органічних природних сполук при нестачі повітря (деревини, торфу, нафтопродуктів та ін.), у результаті якого утворюються летучі речовини, зола та рідкі продукти (смоли та інші органічні речовини). В більш широкому розумінні – це розклад будь-яких сполук на складові менш важкі молекули або елементи під дією підвищеної температури. Кількість та склад продуктів залежить від типу палива, кінцевої температури піролізу, швидкості нагрівання та розміру часток, тиску в реакторі, часу перебування палива в ньому, умов видалення летучих та складу навколишнього газового середовища.

Постановка проблеми. У представленій роботі проводяться експериментальні дослідження фізико-хімічних процесів при піролізі торфу та розглядається динаміка виходу піролізного газу і напівкоксу з торфу в процесі його термообробки. Сьогодні використання торфу стає все актуальнішим через зростання цін на енергоносії, застосування нових технології перероблення та спалювання торфу, що дозволяють автоматизувати такий процес. Україна має достатньо запасів твердого палива, перехід на яке надав би можливість зупинити зростання собівартості теплової енергії комунальної теплоенергетики та зменшити енергетичну залежність держави.

Метою роботи є експериментальне визначення середніх показників торфу для доцільного його використання та дослідження динаміки виходу піролізного газу і напівкоксу з торфу в процесі його термообробки.

Експериментальні дослідження. Карбонізація – це підвищення вмісту вуглецю в органічному паливі, яке відбувається при його термообробці при обмеженому доступі повітря [1]. Тверді продукти карбонізації називаються коксом.

Позиції 1 і 2 на рис. 1 являють собою модуль карбонізації (напівкоксування торфу), а позиції 5-6 відображають вимірювальний комплекс (ВК) [2], який базується на модулях збору даних I-7018 виробництва компанії ICP_DAS, які дають змогу проводити збір даних з 8 окремих аналогових входів і датчика температури (розташованого біля контактних площадок модуля) з частотою вимірювань до 10 Гц. Модуль I-7018 має гальванічну розв'язку до 3000 В і забезпечує передачу цифрових даних по напівдуплексному послідовному інтерфейсу RS-485 на відстань до 1 км (середовище передачі – завита пара). Кількість модулів у одній мережі може досягати 254 шт. У комплексі дані з I-7018 після перетворення у послідовний інтерфейс RS-232 подаються на послідовний порт персонального комп'ютера. Перетворення інтерфейсів RS-485↔RS-232 виконується модулем перетворення I-7520 (ICP_DAS), який також має гальванічну розв'язку до 3000 В. Після входу на послідовний порт персонального комп'ютера дані зчитуються й обробляються спеціальним програмним забезпеченням, яке має такі можливості:

– тестування та формування мережі модулів збору даних;
– вибір частоти опитування модулів (до 1Гц);
– вибір типу датчика (ХА, ВР, ПТП-04, напруга) для кожного входу модуля;
– збереження даних на зовнішньому або внутрішньому носіях з можливістю завдання частоти збереження інформації;
– відображення даних на екрані дисплея у числовому і графічному вигляді у режимі реального часу.

Експериментальні дослідження процесу карбонізації торфу виконувались на установці, принципова схема якої представлена на рис. 1.

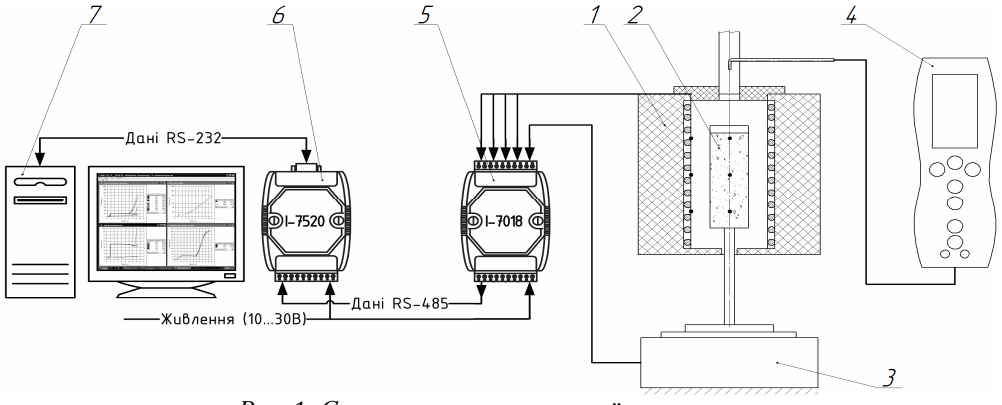


Рис. 1. Схема експериментальної установки:
1 – електрична піч, 2 – тигель з садкою торфу, 3 – електронні ваги ТВЕ-1-0,001, 4 – газоаналізатор TESTO-340, 5 – модуль збору даних I-7018, 6 – модуль перетворення I-7520, 7 – персональний комп'ютер

Принцип роботи установки полягає в такому: виконуємо попереднє зважування садки; поміщаємо тигель з садкою торфу в електричну піч; включаємо піч, здійснюємо нагрівання з темпом підйому температури 400 К/год; робимо витримку впродовж 1 год при температурі 650–670 °С; у процесі досліджень безперервно проводиться контроль відхідних газів за допомогою газоаналізатора і контроль втрати маси з виходом летючих; відключаємо піч від електроживлення; далі охолоджуємо протягом 5 год; виконуємо зважування садки після термообробки. При проведенні експериментальних досліджень у модуль карбонізації послідовно розміщалось 5 садок торфу з різними фракціями: 0,5-1 мм – 20 %; 2-5 мм – 40 %; 10-25 мм – 35 %; 30-50 мм – 5 %.

Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 2 і в таблицях 3-5.

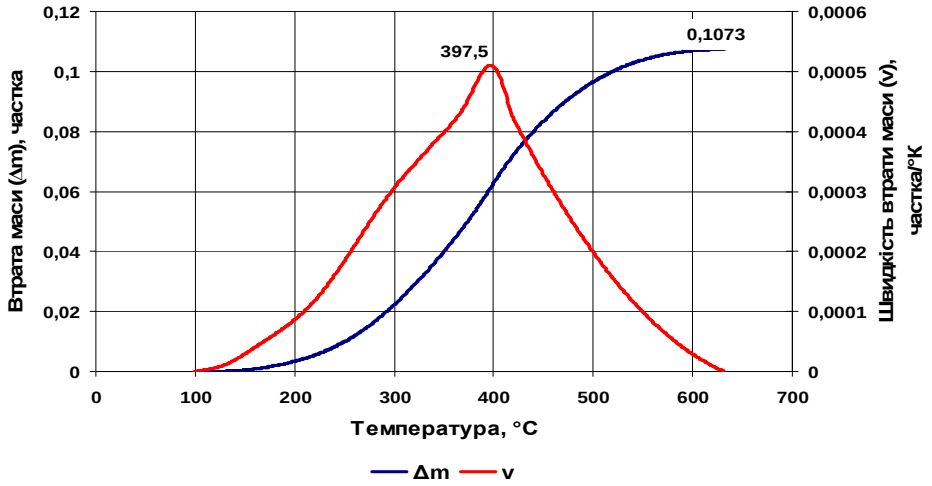


Рис. 2. Динаміка виходу піролізного газу з торф'яних садок (середнє значення 5 експер.)

Таблиця 3

Маса вихідного торфу садок і торф'яного вугілля після термообробки

№ садки	Маса, г	
	Торф	Торф'яне вугілля
1	53,82	20,52
2	49,58	20,15
3	41,26	16,83
4	42,27	17,37
5	47,54	18,95
Всього	234,46	93,82

Таблиця 4

Технічний склад торф'яного вугілля (напівкоксу)

№ садки	Склад торф'яного вугілля мас., %			
	Вологість	Летучі	Зола	Сухий напівкокс
1	5,95	6,10	37,33	48,16
2	4,77	3,84	41,74	51,96
3	4,28	4,14	42,14	52,42
4	5,77	5,14	42,24	51,99
5	5,23	4,54	39,41	50,72
Середнє значення	5,20	4,75	40,57	51,05

Дані таблиці 4 свідчать про те, що після карбонізації усі дослідні зразки мають низьку вологість та високу зольність. Вміст летучих речовин становить близько 4-6 %, що показує, що під час експерименту майже всі летучі речовини видалені з торфу.

Таблиця 5

Хімічний склад отриманого торф'яного вугілля

Елементний склад торф'яного вугілля, мас. %					Нижча робоча теплота згоряння, $Q_{н}^{р}=\frac{339C^{р}+1030H^{р}-108,9\left(O^{р}-S^{р}\right)-25W^{р}}{1000}$ *МДж / кг* де $C^{р},H^{р},O^{р},S^{р},W^{р}$ – складові елементи робочого палива, %
$C^{г}$	$H^{г}$	$O^{г}$	$N^{г}$	$S^{заг}$	17,29
93,84	0,83	0,35	4,98	0	

Повний вихід сухого торф'яного вугілля $(m,\%)$ в перерахунку на суху масу торфу:

$$m=\frac{m_{вуг}\left(100-W_{вуг}\right)}{m_{торф}\left(100-W_{торф}\right)},$$

де $m_{торф}$ – маса торф'яного зразка, кг; $m_{вуг}$ – маса зразка отриманого торф'яного вугілля, кг; $W_{торф}$ – вологість торфу, %; $W_{вуг}$ – вологість отриманого торф'яного вугілля, %.

Хімічний ККД $(\eta_{хім},\%)$ конверсії торфу в торф'яне вугілля розраховується:

$$\eta_{хім}=\frac{Q_{н\,вуг}^{р}m_{вуг}\left(\frac{100}{100-W_{вуг}}\right)}{Q_{н\,торф}^{р}m_{торф}}100=\frac{17,29\cdot 0,09382\left(\frac{100}{100-5,2}\right)}{11,49\cdot 0,23446}100=63,52\%,$$

де $m_{торф}$ – маса торф'яного зразка, кг; $m_{вуг}$ – маса зразка отриманого торф'яного вугілля, кг; $W_{вуг}$ – вологість отриманого торф'яного вугілля, %; $Q_{н\,вуг}^{р}$ – нижча теплота згоряння отриманого торф'яного вугілля, МДж/кг; $Q_{н\,торф}^{р}=12,25$ МДж/кг – нижча теплота згоряння торфу.

Вміст фіксованого вуглецю на суху масу без золи розраховується:

$$C_{fix}=\sum_{i=1}^{n}\left(C_i\frac{100}{100-W_i-A_i}\frac{m_i}{m_{\Sigma}}\right)=94\%,$$

де C_i – вміст вуглецю в i зразку вугілля, %; W_i – вміст вологи в i зразку вугілля, %; A_i – вміст золи в i зразку вугілля, %; m_i – маса зразка вугілля, кг; m_{Σ} – загальна маса усіх зразків вугілля, кг; n – кількість зразків.

Висновки:

– експериментально досліджено динаміку виходу піролізного газу і напівкоксу з торфу в процесі його термообробки;

– у результаті піролізу можна отримати торф'яне вугілля з нижчою робочою теплотою згоряння 17,29 МДж/кг, тобто в 1,5 рази вищою ніж у торфу;

– вихід сухого торф'яного вугілля в перерахунку на суху масу торфу становить 51,05 %;

– вміст фіксованого вуглецю на суху масу без золи становить 94 %;

– хімічний ККД конверсії торфу у напівкокс або торф'яне вугілля становить 63,52 %.

Список використаних джерел

1. *Богданов Н. Н.* Полукоксование и газификация торфа / Н. Н. Богданов. – М. : Госэнергоиздат, 1947. – 268 с.

2. *Панов Е. Н.* Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28-30.

3. *Енергозбереження* – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк ; відпов. ред. А. К. Шидловський. – К. : УЕЗ, 1998. – 506 с.

4. *Bridgwater A. V.* Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids / A. V. Bridgwater // Journal of Analytical and Applied Physics. – 1999. – Vol. 51 (1-2). – P. 3-22.

5. *Родовища* торфу [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://plast.vn.ua/0104_5.html.

6. *Физические* величины : справочник / под ред. И. С. Григорьва. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

7. *Краснощеков Е. А.* Задачник по теплопередаче : учеб. пособие / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1969. – 264 с.

8. *ООО Строй Неруд*. Образование торфа [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nerud-m.ru.

9. *A New* $k-\varepsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation / T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu // Computers Fluids. – 1995. – Vol. 24. – No. 3. – P. 227-238.

10. *Poinsot T.* Theoretical and numerical combustion / Thierry Poinsot, Denis Veynante. – 2nd ed. – Philadelphia : Edwards, 2005. – 522 p.

11. *Magnussen B. F.* On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute. – Pittsburgh, 1976. – P. 719-727.

12. *Коринчук Д. М.* Исследование массовой теплоты сгорания и зольности композиционных торфяных брикетов / Д. М. Коринчук, Ю. Ф. Снежкин, В. А. Михайлик // Возобновляемая энергетика. – 2008. – № 3. – С. 76-82.

13. *Коринчук Д. М.* Исследование структурно-механических свойств композиционных брикетов на торфяной основе с использованием органических бытовых отходов / Д. М. Коринчук, В. А. Михайлик, К. О. Коринчук // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 53-58.

UDC 539.3:534.1

V.H. Dubenets, Doctor of Technical Sciences
O.V. Savchenko, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

OPTIMIZATION OF MULTILAYERED ELECTRO-VISCOELASTIC PLATES

В.Г. Дубенець, д-р техн. наук
О.В. Савченко, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОШАРОВИХ ПЛАСТИН З ЕЛЕКТРОВ'ЯЗКОПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ

В.Г. Дубенец, д-р техн. наук
Е.В. Савченко, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ИЗ ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Mathematical modeling of vibrations of multilayered electro-viscoelastic material plates with passive energy dissipation and the optimal design problem of plates by maximum damping criterion using genetic algorithms are considered.

Key words: *multilayered plates, electro-viscoelastic materials, passive energy dissipation, vibration damping, optimization, genetic algorithms.*

Розглядаються методи математичного моделювання коливань пластин з шарами електров'язкопружних матеріалів з пасивним розсіянням енергії і задача оптимального проектування таких пластин за критерієм максимального демпфірування за допомогою методу оптимізації на основі генетичного алгоритму.

Ключові слова: *багатошарові пластини, електров'язкопружні матеріали, пасивне розсіяння енергії, демпфірування коливань, оптимізація, генетичні алгоритми.*

Рассматриваются методы математического моделирования колебаний пластин со слоями электровязкоупругих материалов с пассивным рассеянием энергии и задача оптимизации таких пластин по критерию максимального демпфирования с помощью метода оптимизации на основе генетического алгоритма.

Ключевые слова: *многослойные пластины, электровязкоупругие материалы, пассивное рассеяние энергии, демпфирование колебаний, оптимизация, генетические алгоритмы.*

Introduction. Thin-walled structural elements of viscoelastic composite materials are widely used in engineering, aerospace, shipbuilding and other fields of technology.

The advantages of fiber-reinforced composite materials in comparison with homogeneous ones are high specific stiffness, wide operating temperature range and the potential for significant variable damping, which is the determining factor for structures working under dynamic loads. The problem of vibration damping of structures with homogeneous structural materials, formulated by G. S. Pysarenko and his school [1, 2, 3], has received further development towards the using of composite materials [3, 4] and rational distribution of damping materials in structures to ensure maximum operational parameters, in particular, energy dissipation [4].

A potential for wide variation of physical and mechanical properties by changing the design parameters, including changes in fiber orientation and fiber concentration in order to obtain materials with desired properties was the main thing that attracted designers. This led to the possibility of design optimization by criteria of stiffness, mass, damping, and others [4].

The appearance of materials with special properties (piezoelectric materials, shape-memory alloys, etc.) intensified research towards the creation of structures with maximum passive and regulated energy dissipation [5]. The development of this line of investigations is associated primarily with research of V. H. Karnaukhov's school [6, 7] in Ukraine and Ural Branch of Russian Academy of Sciences under the direction of V. Matveyenko [8] in Russia.

Foreign scientists' research started to develop intensively several years earlier and at present have reached the level of practical use of active and passive damping in the special purpose structures [9].

Efficient use of materials with special properties is associated with development and application of the optimization techniques. An optimization problem involves finding the vector of design parameters that provides extreme objective function value under given constraints on the design parameters. This is a so-called conditional global optimization problem. Most optimization methods are aimed at searching for local extremum, but there are techniques that can increase the likelihood of determining the global extremum.

In this paper a method based on the use of the genetic algorithm [10] is applied.

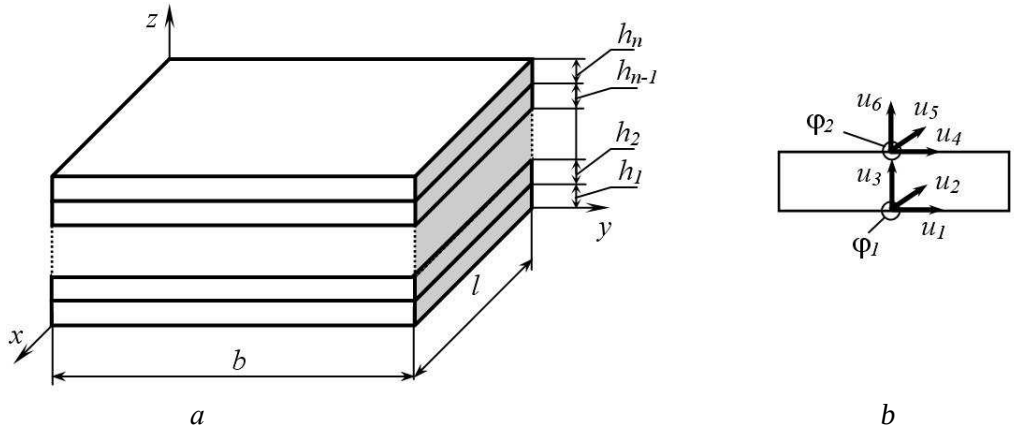
Mathematical Model of a Multi-Layer Plate. This paper presents a method of selecting optimal parameters for multilayered plates with electro-viscoelastic material layers having modified damping properties due to external damping electrical circuits (shunts).

Dynamics variational equation [5, 11] of electro-viscoelastic solid of volume V, bounded by area S with the external forces p_S set on one part of S_1, and the electric charges q_S on the other part of S_2, was used to construct a mathematical model of the dynamics of the electro-viscoelastic material plate:

$$\rho\int_V \delta u^T \frac{d^2u}{dt^2}dV + \int_V \delta\varepsilon^T \sigma dV - \int_{S_1} \delta u^T p_S dS - \int_V \delta E^T D dV + \int_{S_2} \delta\varphi^T q_S dS = 0, \quad (1)$$

where u, ε, σ are displacements, strains and stresses respectively, E – electric field, D – electric displacement, φ – potential.

Dividing the plate by depth into n layers (Fig. 1a) we obtain the computational equations for the i-th layer.



a *b*

Fig. 1. Multi-layer plate
a – nodal planes, b – nodal displacements and potentials

To approximate the displacements and potentials by plate depth the linear Lagrange polynomial is used, and in the plane layers the globally defined functions of coordinates in compliance with the fixation conditions at the ends are used. The parameters of a layer, either viscoelastic or electro-viscoelastic one, are calculated according to the accepted synthesis method of multilayered plates [12], then the full package of layers is formed in a traditional way, using boundary conditions on the contact surfaces.

The linear approximation of the displacements u and the potential φ by depth in the i-th layer is accepted as:

$$u = N_u u_k, \quad \varphi = N_\varphi \varphi_k, \tag{2}$$

where N_u, N_φ are approximation function matrices, u_k, φ_k – nodal displacement and potential (Fig. 1b):

$$N_u = \begin{bmatrix} N_z^1 N_{xy}^u & N_z^1 N_{xy}^v & N_z^1 N_{xy}^w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_z^2 N_{xy}^u & N_z^2 N_{xy}^v & N_z^2 N_{xy}^w \end{bmatrix},$$

$$N_\varphi = \begin{bmatrix} N_z^1 N_{xy}^\varphi & N_z^2 N_{xy}^\varphi \end{bmatrix}, \quad N_Z^1 = (1 - \frac{z}{h}), \; N_z^2 = \frac{z}{h}.$$

$$u = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6], \quad \varphi = [\varphi_1, \varphi_2]. \tag{3}$$

Functions $N_{xy}^u, N_{xy}^v, N_{xy}^w, N_{xy}^\varphi$ are selected according to the fixation conditions of the layer on the edges of the plate.

The strain tensor (in vector notation) and the electric field vector considering discretization are given as:

$$\varepsilon = A_u N_u u, \quad E = -A_\varphi N_\varphi \varphi, \tag{4}$$

where

$$A_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad A_\varphi = -\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial z}{\partial} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

As is known [11], most piezoelectric materials exhibit properties of linear hereditary environment at low strain and electric field intensity values.

Linear dependences of the hereditary theory of electro-viscoelastic material are given as:

$$\begin{aligned}\sigma(X,t) &= \int_0^t R_c(X,t-\tau)\dot{\varepsilon}(X,\tau)d\tau - \int_0^t R_e(X,t-\tau)\dot{E}(X,\tau)d\tau,\\ D(X,t) &= \int_0^t K_e(X,t-\tau)\dot{\varepsilon}(X,\tau)d\tau + \int_0^t R_k(X,t-\tau)\dot{E}(X,\tau)d\tau,\end{aligned} \tag{6}$$

where $R_c(X,t-\tau)$, $R_e(X,t-\tau)$, $R_k(X,t-\tau)$ are relaxation functions matrices of viscoelastic, piezoelectric and dielectric material properties respectively, $\sigma(X,t)$, $D(X,t)$ – stress and electric displacement, $\dot{\varepsilon}(X,t)$, $\dot{E}(X,t)$ – electric field change and deformation velocity respectively, X – coordinate axes vector.

We express the equation (6) using the concept of convolution functions a*b $= \int_0^t a(X,t-\tau)\dot{b}(X,\tau)d\tau$, and obtain

$$\sigma = R_c * \dot{\varepsilon} - R_e * \dot{E}, \quad D = R_e * \dot{\varepsilon} + R_k * \dot{E}. \tag{7}$$

After substituting physical dependences (7) in equation (1), we get the variational dynamic equations of the i-th electro-viscoelastic layer as:

$$\begin{aligned}&\int_V (\delta u)^T \rho \ddot{u} dV + \int_V (\delta\varepsilon)^T \left(R_c * \dot{\varepsilon} - R_e * \dot{E}\right) dV - \int_{S_1} (\delta u)^T p_S dS -\\ &-\int_V (\delta E)^T \left(R_e * \dot{\varepsilon} + R_k * \dot{E}\right) dV - \int_{S_2} (\delta\varphi)^T q_\varphi dS = 0.\end{aligned} \tag{8}$$

Further we use the displacements and potential approximations introduced above (2)-(4), and take the displacement and potential vector variations outside the integral sign, equating to zero the multipliers of variations. As a result, we obtain a system of integro-differential equations for the vector potential and displacements as:

$$\begin{aligned}M_{uu}\ddot{u}_k + K_{uu} * \dot{u}_k + K_{u\varphi} * \dot{\varphi}_k &= F,\\ K_{\varphi u} * \dot{u}_k + K_{\varphi\varphi} * \dot{\varphi}_k &= Q,\end{aligned} \tag{9}$$

where

$$\begin{aligned}&M_{uu} = \int_V \rho N_u^T N_u dV,\ K_{uu} = \int_V B_u{}^T R_c B_u dV,\quad K_{u\varphi} = \int_V B_u{}^T R_e B_\varphi dV,\\ &K_{\varphi u} = \int_V B_\varphi{}^T R_e B_u dV,\quad K_{\varphi\varphi} = \int_V B_\varphi{}^T R_k B_\varphi dV,\quad F = \int_S N_u{}^T p_S dS,\quad Q = \int_S N_\varphi{}^T q_S dS.\end{aligned} \tag{10}$$

We apply to (9) the direct Fourier transform [13] and obtain the equation system for the Fourier images of displacements $\tilde{u}$ and potential $\tilde{\varphi}$:

$$\begin{aligned}-\omega^2 M_{uu}\tilde{u} + \tilde{K}_{uu}\tilde{u} + \tilde{K}_{u\varphi}\tilde{\varphi} &= \tilde{F} + f,\\ \tilde{K}_{\varphi u}\tilde{u} + \tilde{K}_{\varphi\varphi}\tilde{\varphi} &= \tilde{Q},\end{aligned} \tag{11}$$

where $f = j\omega M_{uu}\dot{u}(0) + M_{uu}u(0)$, $j = \sqrt{-1}$, and $u(0)$, $\dot{u}(0)$ are initial displacement and initial velocity of layer nodal points respectively,

$$M_{uu} = \int_V \rho N_u^T N_u dV,\ \tilde{K}_{uu} = \int_V B_u{}^T \tilde{c} B_u dV,\quad \tilde{K}_{u\varphi} = \int_V B_u{}^T \tilde{e} B_\varphi dV,$$

$$\tilde{K}_{\varphi u} = \int_V B_\varphi{}^T \tilde{e}^T B_u dV,\quad \tilde{K}_{\varphi\varphi} = \int_V B_\varphi{}^T \tilde{k} B_\varphi dV,\quad \tilde{F} = \int_S N_u{}^T \tilde{p}_S dS,\quad \tilde{Q} = \int_S N_\varphi{}^T \tilde{q}_S dS,$$

where M_{uu} – mass matrix, $\tilde{K}_{uu}, \tilde{K}_{u\varphi}, \tilde{K}_{\varphi u}, \tilde{K}_{\varphi\varphi}$ – stiffness, piezoelectric, coupling and capacitance complex matrices respectively, $\tilde{F}, \tilde{Q}$ – the external mechanical force and electric charge, $\tilde{c}, \tilde{e}, \tilde{k}$ – the viscoelasticity constants, the piezoelectric coupling coefficients, the dielectric constants complex matrices respectively.

The equation (11) differs from (9) by a reasonable potential for using frequency-dependent modules in analysis of non-stationary and multi-frequency vibrations [3, 4], and the capability to account initial conditions.

It is known [7] that the application of piezoelectric materials is caused not due to their vibration damping ability, which is comparably low against special viscoelastic materials, but due to the potential of increasing the passive damping by converting mechanical energy into electrical energy and then into heat (sensors), and by creating efforts opposite to structure deformation (actuators).

Without further analysis of costs and benefits of these two methods, in this paper we restrict ourselves to the passive damping analysis and obtain the piezoelectric layer vibration equations, where the damping increase is caused by the use of special devices (shunts).

Note that using electrical shunts makes possible the creating of special materials capable of reacting to the effect of an electric current by significant increase of damping properties.

Returning to equations (11), we consider the vibration of the plate with an attached RL-shunt (Fig. 2).

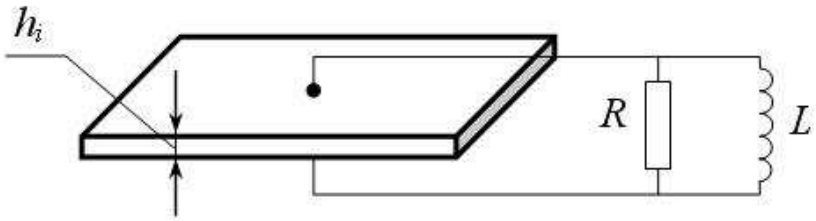


Fig. 2. Plate with an attached RL-shunt

As shown in [6, 9], vibration equation of the piezoelectric material plate can be used to analyze several cases of exploiting piezoelectric material properties. In particular, when the electrodes are supplied by the voltage (potential φ), the electromechanical load that makes the piezoelectric element function in the mode of excitation of oscillations (actuator) can be created. In this case the vibration equation is noted as:

$$-\omega^2 M\tilde{u} + \tilde{K}_{uu}\tilde{u} = \tilde{F} - \tilde{K}_{u\varphi}\tilde{\varphi}. \tag{12}$$

In an open circuit $Q = 0,$ and the equation for the natural frequencies and forced vibration analysis is obtained as:

$$-\omega^2 M\tilde{u} + (\tilde{K}_{uu} - \tilde{K}_{u\varphi}\tilde{K}_{\varphi\varphi}^{-1}\tilde{K}_{\varphi u})\tilde{u} = \tilde{F}. \tag{13}$$

To account the attached external passive components, the equation (13) can be used, extending its matrix $\tilde{K}_{\varphi\varphi}$ with a matrix or a matrix sum that describes the attached external elements.

Specifically, for the parallel RL-shunt, matrix $\tilde{K}_{\varphi\varphi}$ is supplemented by matrices $\tilde{K}_{\varphi L}$ and $\tilde{K}_{\varphi R}$

$$-\omega^2 M\tilde{u} + (\tilde{K}_{uu} - \tilde{K}_{u\varphi}(\tilde{K}_{\varphi\varphi} + \tilde{K}_{\varphi R} + \tilde{K}_{\varphi L})^{-1} + \tilde{K}_{\varphi u})\tilde{u} = \tilde{F} + f\ , \quad (14)$$

$$\tilde{K}_{\varphi L} = \left(\frac{-1}{\omega^2 L}\right)\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \tilde{K}_{\varphi R} = \left(\frac{1}{i\omega R}\right)\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

The equation for the free vibration analysis considering additional damping and the initial conditions is obtained from (14) with $\tilde{F} = 0$ as:

$$-\omega^2 M\tilde{u} + (\tilde{K}_{uu} - \tilde{K}_{u\varphi}(\tilde{K}_{\varphi\varphi} - \tilde{K}_{\varphi R} + \tilde{K}_{\varphi L})^{-1}\tilde{K}_{\varphi u})\tilde{u} = j\omega M\dot{u}(0) + Mu(0). \quad (16)$$

Design of plate with maximum damping. Let us consider the example of calculation and parameters optimization of a three-layer plate with electro-viscoelastic outer layers and passive material internal layer (Fig. 3). To make the three-layer plate model we use the equations derived above for one layer, the constraints of displacement equality at the contiguous planes, as well as the constraints of potential equality at the connection nodes of external damping elements.

We use displacement and potential approximation functions in this form:

$$N^u_{xy} = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\sin\left(\frac{m\pi x}{l}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right), \quad N^w_{xy} = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\sin\left(\frac{m\pi x}{l}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right),$$

$$N^v_{xy} = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\cos\left(\frac{m\pi x}{l}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right). \quad N^\varphi_{xy} = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\cos\left(\frac{m\pi x}{l}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right).$$

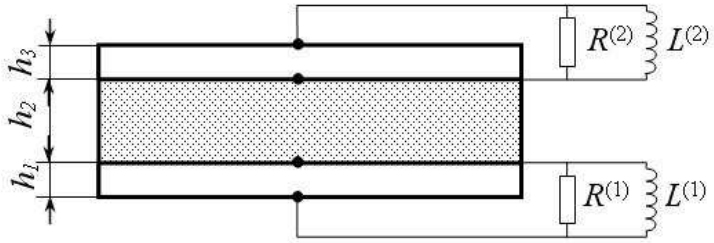


Fig. 3. Three-layer plate with parallel RL-shunts

The input parameters of the plate are dimensions, physical and mechanical properties of materials and shunt electrical parameters. Fundamentally all input parameters are subject to optimization, but are often limited to the most essential, including shunts parameters, layer thicknesses, and material properties. For multi-layered structures the quantity of optimization parameters can significantly increase.

In most cases to solve the problem of designing structures working under dynamic loads the nonlinear programming theory algorithms (NLP) are used.

With the increasing design complexity and the advent of new materials, classic NLP algorithms appeared ineffective due to the significant increase of the design parameters amount, complication of constraints and complex optimization criteria, defined in most cases by software. A significant drawback of classic NLP gradient algorithms is the complexity of calculating derivatives of objective functions and constraints, as well as fundamental disposition to determine only local extremum. These features interfered and continue to interfere with the broad implementation of classic NLP algorithms in the optimal structures design practice.

This led to active development of the search methods that use the principles of biology and genetics in recent years.

First of all, these are the genetic algorithms [14] with the basic idea to create a population of individuals in form of chromosomes, containing genes representing a set of heritable characteristics – design parameters. The best of the individuals is selected in an evolutionary

search in accordance with the adopted fitness function. The evolutionary search process is implemented by using operators, similar to the hybridization, mutation, inversion biological processes. The population is updated with each by creating new and removing old individuals, resulting in ever-improving population in terms of compliance with the fitness function (objective function).

The justifications of using the binary alphabet to encode chromosomes, as well as many respective methods that use pre-encoding and binary chromosomes have appeared in the process of developing genetic (evolutionary) algorithms [14]. However, as it turned out, the binary coding has significant disadvantages when searching at continuous spaces with required accuracy, typical for problems of structural optimization. In this regard, the algorithms based on using chromosomes as a set of real numbers have been recently utilized for optimization in continuous space. Such algorithms are called RGA (real-coded GA) unlike BGA (binary-coded GA) [14].

In this work, the RGA algorithm described in [10] is used.

Examples of three-layer plate optimal parameters computation. We considered three-layer plate with input parameters:

– the plate dimensions $b = 0,4\ m, \quad l = 0,4\ m$;

– the outer layers thickness $h = 0,001\ m$.

Electro-viscoelastic material properties are given in Table.

Table

Material Properties

Coefficients	Outer Layer Material PZT-5	Viscoelastic Middle Layer
Elastic moduli	$c11 = (1+i0.001)\cdot 99.201\cdot 10^9$	$c11 = (1+i0.01)\cdot 183.443\cdot 10^9$
	$c22 = (1+i0.001)\cdot 99.201\cdot 10^9$	$c22 = (1+i0.01)\cdot 11.662\cdot 10^9$
	$c33 = (1+i0.001)\cdot 86.856\cdot 10^9$	$c33 = (1+i0.01)\cdot 11.662\cdot 10^9$
	$c12 = (1+i0.001)\cdot 54.016\cdot 10^9$	$c12 = (1+i0.01)\cdot 4.363\cdot 10^9$
	$c13 = (1+i0.001)\cdot 50.778\cdot 10^9$	$c13 = (1+i0.01)\cdot 4.363\cdot 10^9$
	$c23 = (1+i0.001)\cdot 50.778\cdot 10^9$	$c23 = (1+i0.01)\cdot 3.918\cdot 10^9$
	$c44 = (1+i0.001)\cdot 21.100\cdot 10^9$	$c44 = (1+i0.01)\cdot 2.870\cdot 10^9$
	$c55 = (1+i0.001)\cdot 21.100\cdot 10^9$	$c55 = (1+i0.01)\cdot 7.170\cdot 10^9$
	$c66 = (1+i0.001)\cdot 22.593\cdot 10^9$	$c66 = (1+i0.01)\cdot 7.170\cdot 10^9$
Piezoelectric moduli	$e31 = -7.209\cdot(1+i0.001)$	$e31 = 0.0$
	$e32 = -7.209\cdot(1+i0.001)$	$e32 = 0.0$
	$e33 = 15.118\cdot(1+i0.001)$	$e33 = 0.0$
	$e24 = 12.322\cdot(1+i0.001)$	$e24 = 0.0$
	$e15 = 12.322\cdot(1+i0.001)$	$e15 = 0.0$
Permittivity	$z11 = (1+i0.001)\cdot 153.0\cdot 10^{-10}$	$z11 = 153.0\cdot 10^{-9}$
	$z22 = (1+i0.001)\cdot 153.0\cdot 10^{-10}$	$z22 = 153,0\cdot 10^{-9}$
	$z33 = (1+i0.001)\cdot 153.0\cdot 10^{-10}$	$z33 = 153.0\cdot 10^{-9}$
Density	$g = 6.85\cdot 10^3$	$g = 1.85\cdot 10^3$

Some results of calculation and optimization of a three-layer plate are shown in Fig. 4-6.

We use the optimization method based on the genetic algorithm [10] to determine the optimal parameters of the plate by the maximum damping criterion. Design parameters vector is taken as

$$x = (h_2 \;\; R \;\; L),$$

where h_2 – viscoelastic middle layer thickness (m), R – resistance (Ω), L – inductance (henry).

Design parameters constraints are:

$$lb = [0,001 \;\; 10 \;\; 0,01],\; ub = [0,01 \;\; 500 \;\; 1].$$

The results of the calculation are: the objective function (decrement in the first mode) $\Delta = 0,5328$, frequency $\omega 1 = 1893,2$, maximum amplitude $a = 1,0921 \cdot 10^{-6}\ m$.

Optimal design parameter vector is $x = [0,0100 \;\; 500,0000 \;\; 0,3642]$.

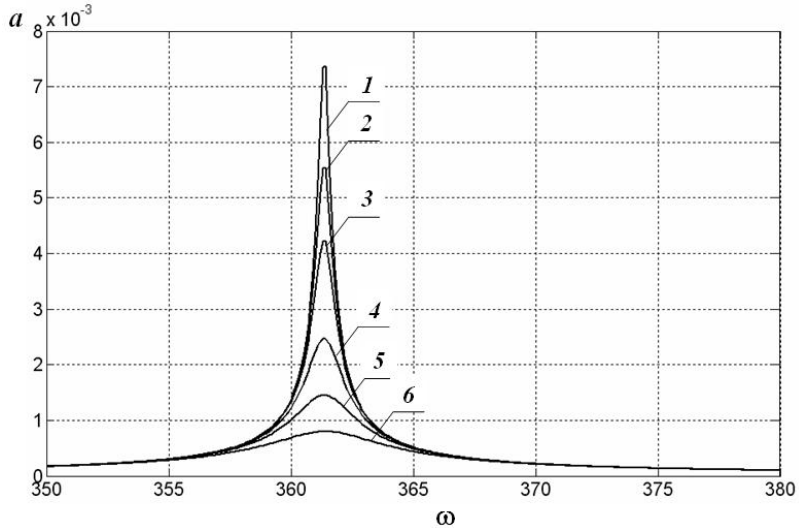


Fig. 4. Frequency response on the first vibration plate mode at zero inductance L and different resistance R:
1 – R=1 Ω ; 2 – R=5 Ω ; 3 – R=10 Ω ; 4 – R=25 Ω ; 5 – R=50 Ω ; 6 – R=100 Ω

In Fig. 5 the frequency responses for optimal design and an arbitrary vector of design parameters with decrement, first frequency and maximum amplitude $\Delta = 0,3075$, $\omega 1 = 995,8709,$, $a = 9,6087 \cdot 10^{-6}\ m$ respectively are shown.

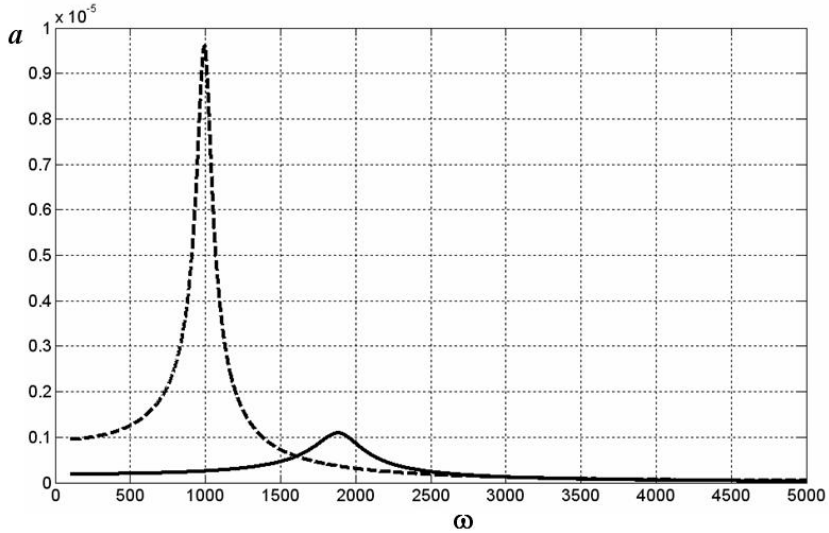


Fig. 5. Frequency response for optimal (solid) and random (dashed) design parameters values

In Fig. 6 damping vibrations graphs for two values of design parameter vectors – optimum and arbitrary are shown.

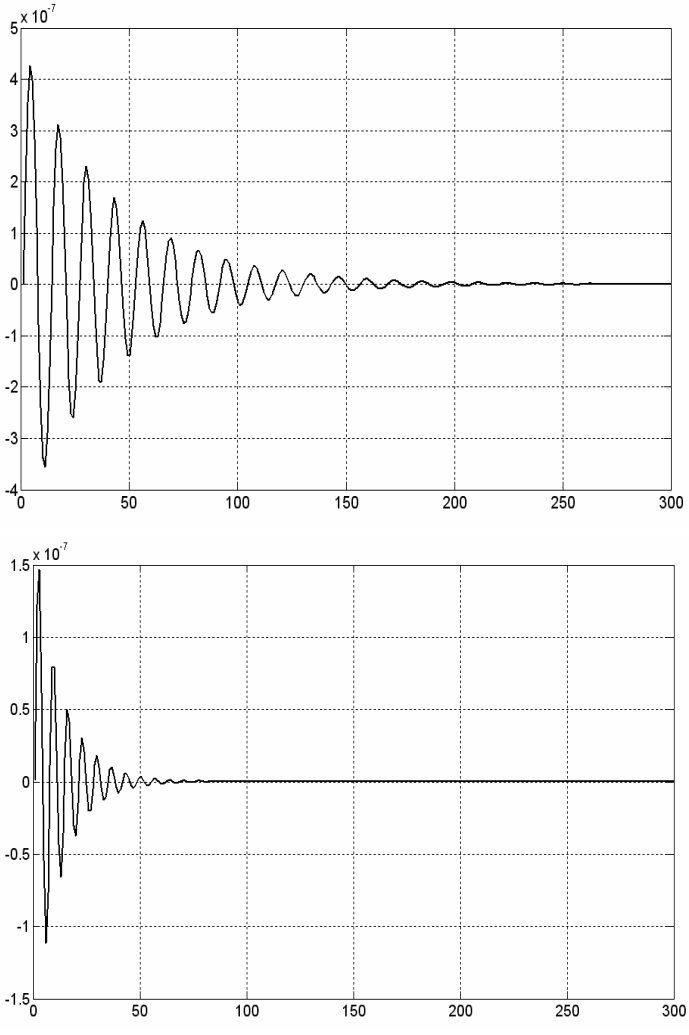


Fig. 6. Damping oscillogram for two values of design parameter vectors: a – arbitrary; b – optimal

Conclusions. Computational vibration equations of multilayer plates with layers of viscoelastic and electro-viscoelastic materials are obtained using the Fourier transform. Damping devices (shunts) are used for additional passive damping that can be employed to create special damping networks.

It is shown that using finite-element models of electro-viscoelastic material structures in the Fourier transform space allows to introduce justified complex moduli for non-stationary and multifrequency vibrations and to take the initial conditions into account correctly. It is necessary to use the optimal design methods to create effective vibration-proof structures.

References

1. *Писаренко Г. С.* Избранные труды / отв. ред. В. Т. Трощенко. – К. : Наук. думка, 2010. – 728 с.

2. *Матвеев В. В.* Демпфирование колебаний деформируемых тел / В. В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1985. – 263 с.

3. *Дубенец В. Г.* Колебания демпфированных композитных конструкций / В. Г. Дубенец, В. В. Хильчевский. – К. : Вища школа, 1995. – Т. 1. – 226 с.

4. *Савченко Е. В.* Пассивное демпфирование колебаний композитных конструкций: монография / Е. В. Савченко. – Нежин : Аспект-Поліграф, 2006. – 232 с.

5. *Механика* связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость / В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга ; отв. ред. А. Н. Гузь ; АН УССР. Ин-т механики. – К. : Наукова думка, 1989. – 280 с.

6. *Карнаухов В. Г.* Демпфирование колебаний тонкостенных элементов конструкций с помощью распределенных пьезоэлектрических включений / В. Г. Карнаухов, В. В. Михайленко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2005. – Вип. 2. – С. 19-34.

7. *Карнаухова Т. В.* Активное демпфирование вынужденных резонансных изгибных колебаний изотропных вязкоупругих пластин при действии на них неизвестной механической нагрузки / Т. В. Карнаухова // Прикл. проблеми мех. і мат. – 2008. – Вип. 6. – С. 154–166.

8. *Численный* анализ динамического поведения smart-композитов на основе пьезоматериалов / В. П. Матвеенко, Е. П. Клигман, Н. А. Юрлова, М. А. Юрлов // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» ; Екатеринбург, 24-28 мая 2010 г. – Екатеринбург, 2010. – 8 с.

9. *Vincent Piefort.* Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures / Thesis submitted in candidature for the degree of Doctor in Applied Sciences. – Universit´e Libre de Bruxelles, 2000-2001. – 154 p.

10. *Савченко О. В.* Метод пошуку глобального екстремуму в задачах оптимізації конструкцій з композиційних матеріалів / О. В. Савченко, І. О. Савченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : зб. – Чернігів : ЧДТУ, 2008. – № 36. – С. 72-81.

11. *Шульга Н. А.* Колебания пьезоэлектрических тел / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев ; отв. ред. Б. П. Маслов ; АН УССР. Ин-т механики. – К. : Наукова думка, 1990. – 228 с.

12. *Дубенець В. Г.* Оптимальне проектування пологих оболонок з композиційних в'язкопружних матеріалів / В. Г. Дубенець, О. В. Савченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : зб. – Чернігів : ЧДТУ, 2010. – № 45. – С. 21-29.

13. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен ; [пер. с англ. М. И. Рейтмана]. – М. : Мир, 1974. – 338 с.

14. *Гладков Л. А.* Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; [под ред. В. М. Курейчика]. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.

РОЗДІЛ ІІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.822.172:621.7.079

Д.Ю. Федориненко, д-р техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЯКІСТЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ШПИНДЕЛЯ З ГІДРОСТАТИЧНИМИ ОПОРАМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ТИПУ

Д.Ю. Федориненко, д-р техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, Чернигов, Украина

КАЧЕСТВО СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ШПИНДЕЛЯ С ГИДРОСТАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ РЕГУЛИРУЕМОГО ТИПА

D.Y. Fedorynenko, Doctor of Sciences
Chernigiv National Technological University, Chernigiv, Ukraine

QUALITY OF MANAGEMENT SYSTEM OF SPINDLE POSITION WITH HYDROSTATICAL SUPPORTS OF ADJUSTABLE TYPE

У роботі з метою підвищення надійності системи та зменшення часу перехідного процесу регулювання розроблено цифрову систему автоматичного керування положенням шпинделя на основі програмованого мікроконтролера та крокового двигуна. Запропоновано математичну модель системи з урахуванням суттєвих нелінійностей. Через імітаційне моделювання засобами системи Simulink визначено характеристики якості системи керування з регульованими шпиндельними гідростатичними опорами. Наведено апаратні та конструктивні засоби підвищення характеристик якості системи керування.

Ключові слова: *якість, система керування, шпиндель, гідростатична опора.*

В работе с целью повышения надежности системы и уменьшения времени переходного процесса регулирования разработана цифровая система автоматического управления положением шпинделя на основе программируемого микроконтроллера и шагового двигателя. Предложена математическая модель системы с учетом существенных нелинейностей. Путем имитационного моделирования средствами системы Simulink определены характеристики качества системы управления с регулируемыми шпиндельными гидростатическими опорами. Приведены аппаратные и конструктивные средства повышения характеристик качества системы управления.

Ключевые слова: *качество, система управления, шпиндель, гидростатическая опора.*

In order to improve system reliability and reduction of time of transition regulation developed digital system of automatic control of position of the spindle on the basis of programmable microcontroller and the stepper motor. Proposed mathematical model of the system with given of the significant non-linearities. By simulation by means of the system Simulink determined the characteristics of the quality management system with adjustable spindle water supports. Proposed hardware and constructive means of improving of the quality management system.

Key words: *quality, management system, spindle, hydrostatic bearing.*

Постановка проблеми. Одним з найбільш ефективних шляхів підвищення точності, продуктивності процесів механічного оброблення на верстатах є застосування прецизійних конструкцій регульованих шпиндельних гідростатичних опор (ГСО), які дозволяють керувати параметрами точності обертання шпинделя, якості оброблення, забезпечують підвищення швидкохідності шпиндельних вузлів. Автоматизація процесу керування параметрами шпиндельних ГСО створює передумови для розроблення нових технологічних процесів прецизійного механічного оброблення на верстатах. Тому актуальною проблемою машинобудування є підвищення точності механічного оброблення на верстатах за допомогою розроблення та використання систем керування положенням шпинделя на основі ГСО регульованого типу.

Аналіз досліджень і публікацій. Авторами робіт [1-3] зазначається ефективність застосування регульованих ГСО для адаптивного керування точністю оброблення на верстатах токарної, фрезерної, шліфувальної груп. Показано, що регульовані ГСО дозволяють керувати розмірами як статичного, так і динамічного налагодження технологічної системи.

Авторами роботи [4] розглянуті підходи щодо керування точністю обертання шпинделя на ГСО, розроблені засоби автоматизації процесу регулювання діаметральним за-

зором на основі нових конструкцій підшипників, відзначено перспективність керування точністю механічного оброблення на основі шпиндельних ГСО регульованого типу.

У роботі [5] для підвищення точності положення шпинделя запропоновано використання електрогідравлічного приводу регулювання зазором у ГСО, наведені перехідні характеристики приводу, визначені динамічні характеристики шпиндельного вузла шліфувального верстата на регульованих ГСО. Однак під час аналізу якості системи керування не враховувалися наявні в ній нелінійності, що знижує точність розрахунку.

У результаті аналізу стану проблеми встановлено, що характеристики якості систем керування положенням шпинделя на регульованих ГСО з урахуванням наявних нелінійностей досліджені недостатньо і потребують подальшого вивчення.

Мета статті. Визначення та аналіз характеристик якості систем керування положенням шпинделя на основі гідростатичних опор регульованого типу з урахуванням наявних у системі нелінійностей, розроблення засобів підвищення характеристик якості системи керування.

Виклад основного матеріалу. З метою підвищення надійності системи та зменшення часу перехідного процесу регулювання запропонована цифрова система автоматичного керування (САК) на основі програмованого мікроконтролера і крокового двигуна, яка наведена на рис. 1. Суть удосконалення полягає у заміні електрогідравлічного приводу виконавчого механізму САК на кроковий електродвигун (КД) з керуванням від мікропроцесорного пристрою (МК) (рис. 2, *а*). Аналогові сигнали U_1, U_2 з безконтактних вимірювачів після аналогово-цифрового перетворення надходять до системи керування мікропроцесорного пристрою, що за програмою формує сигнали керування силовими ключами інвертора (транзисторного комутатора). Інвертор генерує напруги, які безпосередньо надходять на збудження фаз крокового двигуна.

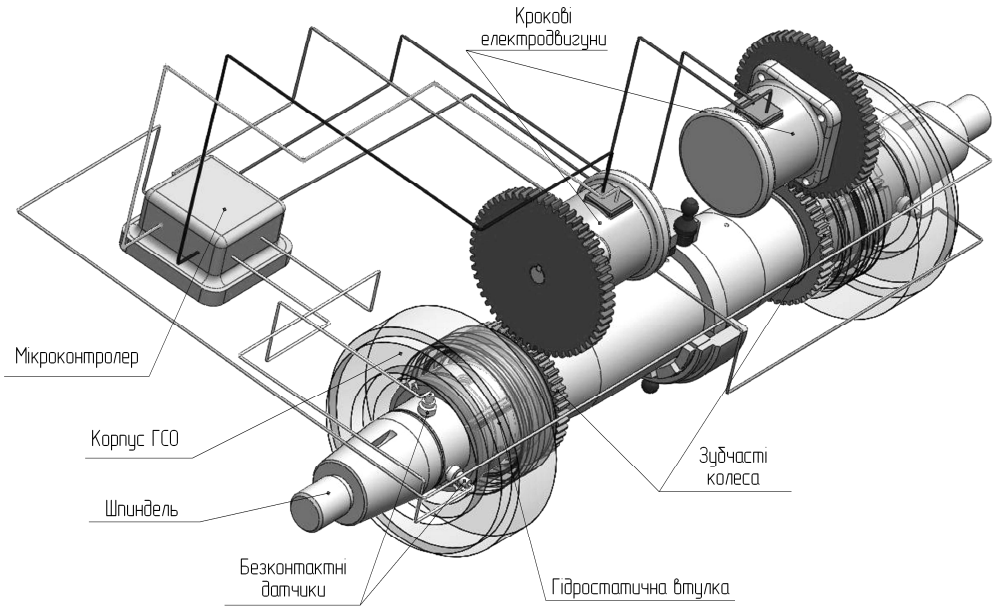
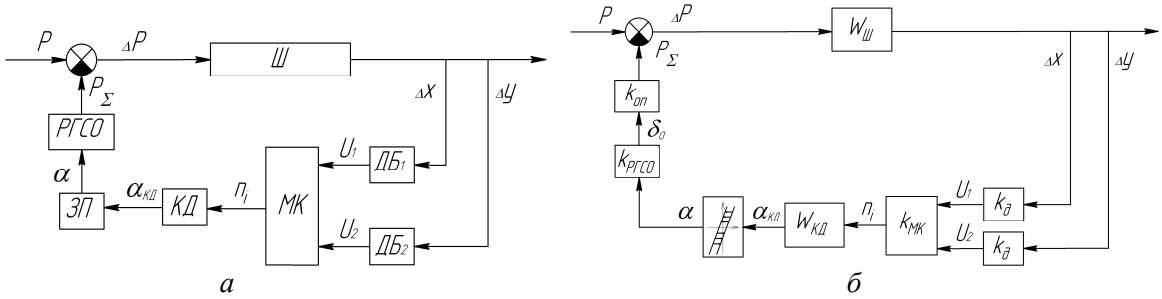


Рис. 1. Принципова схема цифрової САК положенням шпинделя з регулюванням геометричних параметрів ГСО

Кут повороту КД $\alpha_{КД}$ (рис. 2, *а*) пропорційний кількості електричних імпульсів n_i, які надходять до нього від МК за програмою. На валу КД жорстко закріплена шестерня, яка передає обертання зубчастому колесу (рис. 1), що за допомогою різевого з'єднання розміщується на хвостовій частині пружної гідростатичної втулки. При обертанні зазначеного зубчастого колеса гідростатична втулка набуває осьового переміщення, тим самим змінюючи зазор δ_0 в опорних регульованих вузлах шпинделя.



а *б*

Рис. 2. Функціональна а – та структурна б – схеми цифрової САК положенням шпинделя

Таким чином, мікропроцесорний пристрій з кроковим двигуном безпосередньо за показниками безконтактних вимірювачів (ДБ1, ДБ2) здійснює регулювання величиною радіального зазору δ_0.

Можлива також реалізація принципової схеми керування на основі лінійного крокового двигуна на повітряній подушці, що забезпечує високу точність позиціювання при відсутності механічних контактів у системі. Слід також зазначити, що вказані переваги лінійного принципу роботи крокового двигуна фактично нівелюються необхідністю застосування додаткового аеростатичного підвісу з джерелом стисненого повітря.

Надалі обмежимося аналізом САК з кроковим двигуном обертового типу, структурна схема якої наведена на рис. 2, *б*.

Запропонована САК відноситься до цифрового типу, в якій відбувається квантування сигналів за часом та рівнем. Квантування за часом робить цифрову систему дискретною, а квантування за рівнем – нелінійною. Мікропроцесорний пристрій системи реалізує дискретний релейний закон регулювання за певним алгоритмом. Характерною рисою САК є інерційність гідромеханічної частини системи щодо цифрової. Так, частоти спрацьовування регульованої ГСО знаходяться в межах 0,5...2 Гц, у той же час частоти цифрового оброблення інформації мають порядок у МГц. У цьому випадку, як зазначається у роботі [6], впливом квантування на динаміку САК можна знехтувати. Отже, для дослідження цифрової САК можна застосовувати математичний апарат аналізу неперервних систем.

Математичний опис елементів САК та методика лінеаризації нелінійної частини системи докладно розглянуто у роботі [7]. Надалі зосередимося на особливостях обчислення та аналізу характеристик якості САК.

Для визначення характеристик якості мехатронної САК положенням шпинделя розроблено імітаційну модель системи засобами Simulink (рис. 3). Враховуючи можливість застосування принципу суперпозиції для лінійної частини системи, в імітаційній моделі розглянуто контур зворотного зв’язку за координатою x.

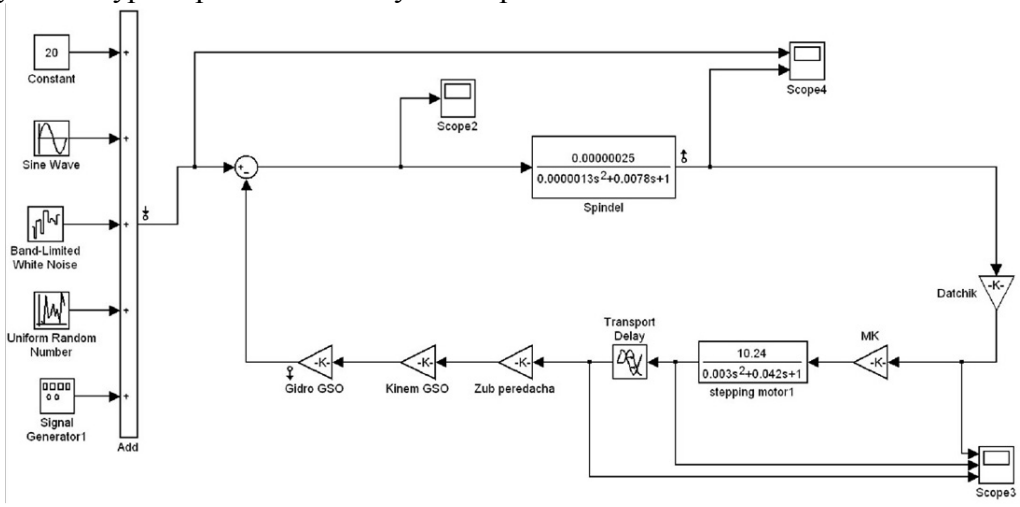


Рис. 3. S-модель цифрової САК положенням шпинделя

Як видно з рис. 2, *б*, у системі є одна суттєва нелінійність, обумовлена люфтом у зубчастій передачі. Використання для моделювання люфту блока Backlash, що відповідає петлеподібній характеристиці елемента, при лінеаризації системи засобами LTI Viewer пакета Simulink призводить до значних похибок лінеаризації. У робочому циклі регулювання зазору здійснюється у сторону його зменшення. Тому для опису зазору в зубчастому зачепленні запропоновано використання блока Transport Delay, що забезпечує затримку сигналу в часі під час вибирання зазору в зубчастому зачепленні в одному напрямку. Значення параметра time dalay (кількість кроків модельного часу) блока Transport Delay розраховано на вибирання зазору c=8,9 кут. хв і становить $4 \cdot 10^{-4}$ с.

У результаті дослідження системи засобами LTI Viewer отримані: перехідна характеристика (рис. 4, *а*), годограф амплітудно-фазово-частотної характеристики (АФЧХ) системи у розімкненому стані (рис. 4, *б*), амплітудно-частотна (АЧХ) і фазово-частотна характеристики (ФЧХ) системи (рис. 4, *в*).

Як видно з графіка на рис. 4, *а*, перехідна характеристика САК має яскраво виражений коливальний характер, що пояснюється наявністю в системі двох коливальних ланок другого порядку. Система керування має швидкодію близько 1,09 Гц; перерегулювання – 36 %; затухання за період – 91,3 %. За годографом АФЧХ системи (рис. 4, *б*) у розімкненому стані встановлено, що система є сталою. Величина смуги пропускання частот $L_{СЧ}$ становить близько 1,8 Гц (рис. 4, *в*), а запас сталості за амплітудою 36,4 дБ (рис. 4, *б*), що задовольняє вимогам до металорізальних верстатів [8].

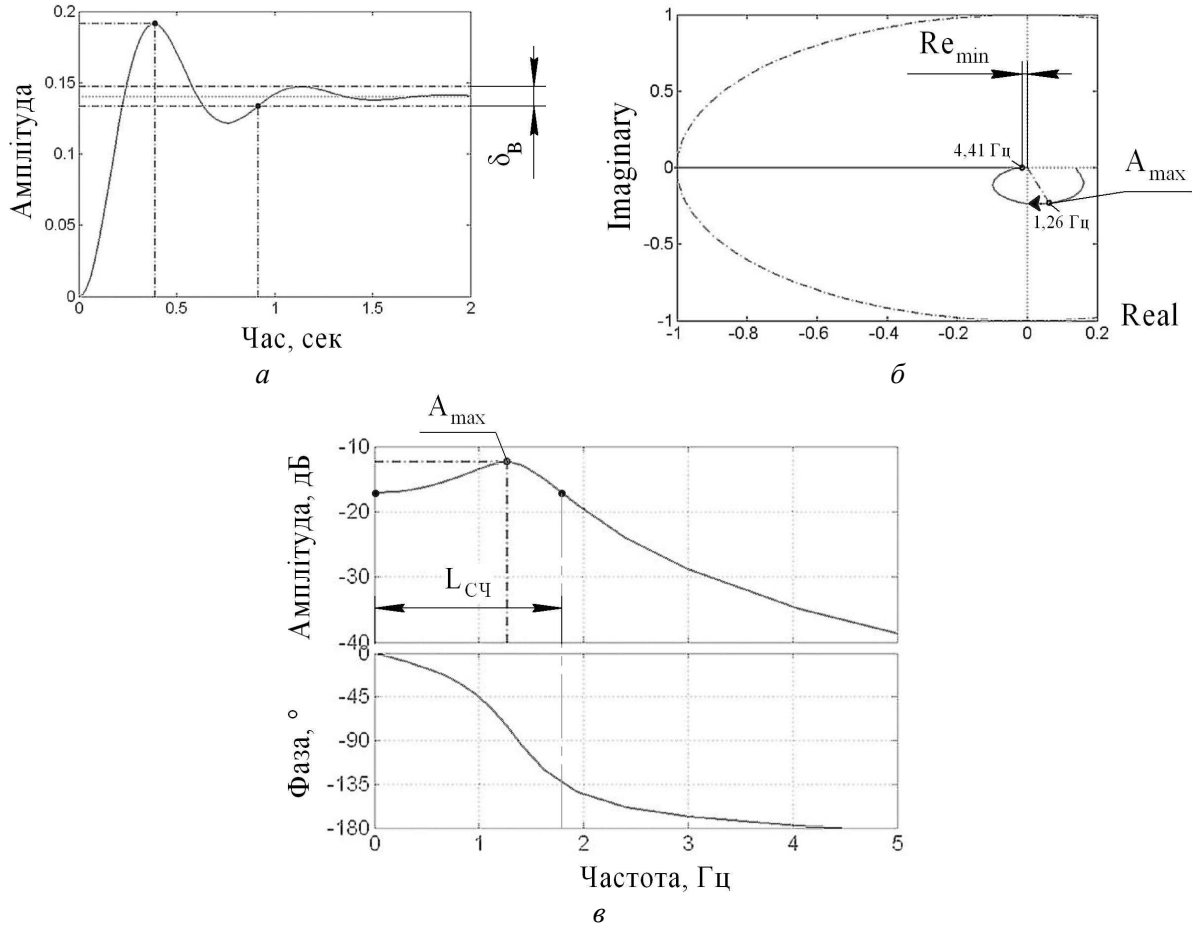


Рис. 4. Якісні характеристики САК положенням шпинделя

Запропонована САК положенням шпинделя з регулюванням геометричними параметрами ГСО має суттєву нелінійність у вигляді люфту, який є наслідком наявності ре-

гламентованого бічного зазору в зубчатій передачі, і значно погіршує динамічні характеристики та точність регулювання.

З метою поліпшення якісних характеристик САК пропонується два способи компенсації люфту в зубчастій передачі, а саме: апаратний та конструктивний.

Сутність апаратного способу полягає у компенсації люфту попередньою корекцією керуючої програми мікроконтролера на основі апріорної інформації про фактичне значення бічного зазору в передачі. Попереднє максимальне значення бічного зазору розраховується за формулою [9] $\Delta_{зп} = 6{,}88 \cdot C_n / (m \cdot z_2)$ (кут. хв) з наступним коригуванням за результатами фактичних вимірів. У попередньому виразі позначено: C_n – максимальний бічний зазор за рекомендаціями [10], мкм; m – модуль зчеплення, мм; z_2 – число зубців веденого колеса.

Розроблений алгоритм керування виконавчими механізмами приводу – керованими ГСО з компенсацією люфту в зубчастих передачах (рис. 5).

Початковими даними наведеного алгоритму є поточне значення зазору δ_i та величина результуючого кута повороту α_i. Зазначені параметри δ_i, α_i накопичуються протягом усього періоду роботи САК, а при зупинці системи сумарне значення кута α_i використовується для повернення крокового двигуна у початкове положення.

Керування відбувається таким чином. Аналогові сигнали (напруги) U_1, U_2 з безконтактних вимірювачів ДБ1 і ДБ2 (рис. 2), пропорційні зміщенням шпинделя Δx_i, Δy_i по координатних осях OX і OY відповідно, надходять на вхід мікроконтролера, оцифровуються і порівнюються з величиною ρ_{max} – максимальним значенням радіус-вектора (в полярній системі координат), що визначає положення осі шпинделя, при якому вихідна точність задовільна.

Якщо $\rho_i \le \rho_{max}$, то у корегуванні немає необхідності, сигнали на кроковий двигун не надходять. Поточне значення радіус-вектора ρ_i, що визначає положення осі шпинделя, визначається за залежністю

$$\rho_i = k_д \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} ,$$

де $k_д$ – коефіцієнт підсилення безконтактних вимірювачів переміщень.

Під час виконання умови $\rho_i \ge \rho_{max}$ результуюче значення δ_i порівнюється з мінімально припустимою величиною статичного зазору δ_{min}. Якщо $\delta_i \le \delta_{min}$, сигнал на двигун не надходить. В іншому випадку здійснюється дискретне корегування зазору в підшипнику на значення $\Delta\delta$, наприклад, 5 мкм. На двигун надходить кількість імпульсів n_i (рис. 2), необхідна для повороту крокового двигуна на кут $\alpha_{КД}$, який, у свою чергу, пропорційний зміні зазору $\Delta\delta$:

$$n_i = \alpha_{КД} \cdot N_1 , \; \alpha_{КД} = \frac{180 \cdot D_p \cdot i_n \cdot \Delta\delta}{L_p \cdot R_p \cdot n_p \cdot tg\beta} , \qquad (1)$$

де N_1 – кількість імпульсів, необхідних для повороту вала крокового двигуна на кут 1°; R_p – радіус різі на хвостовій частини гідростатичної втулки; D_p – середній діаметр різі; i_n – передавальне відношення зубчастої передачі; L_p – крок різі; n_p – число заходів різі; β – кут нахилу конічної поверхні гідростатичної втулки.

Значення у знаку дробу формули (1) є геометричними й кінематичними параметрами механічної передачі. Для першої ітерації коригування слід урахувати компенсацію люфту

$$\alpha'_{КД} = \alpha_{КД} + \alpha_Л ,$$

де $\alpha_Л$ – додатковий кут пороту двигуна для компенсації бічного зазору $\Delta_{зп}$ у зубчастій передачі.

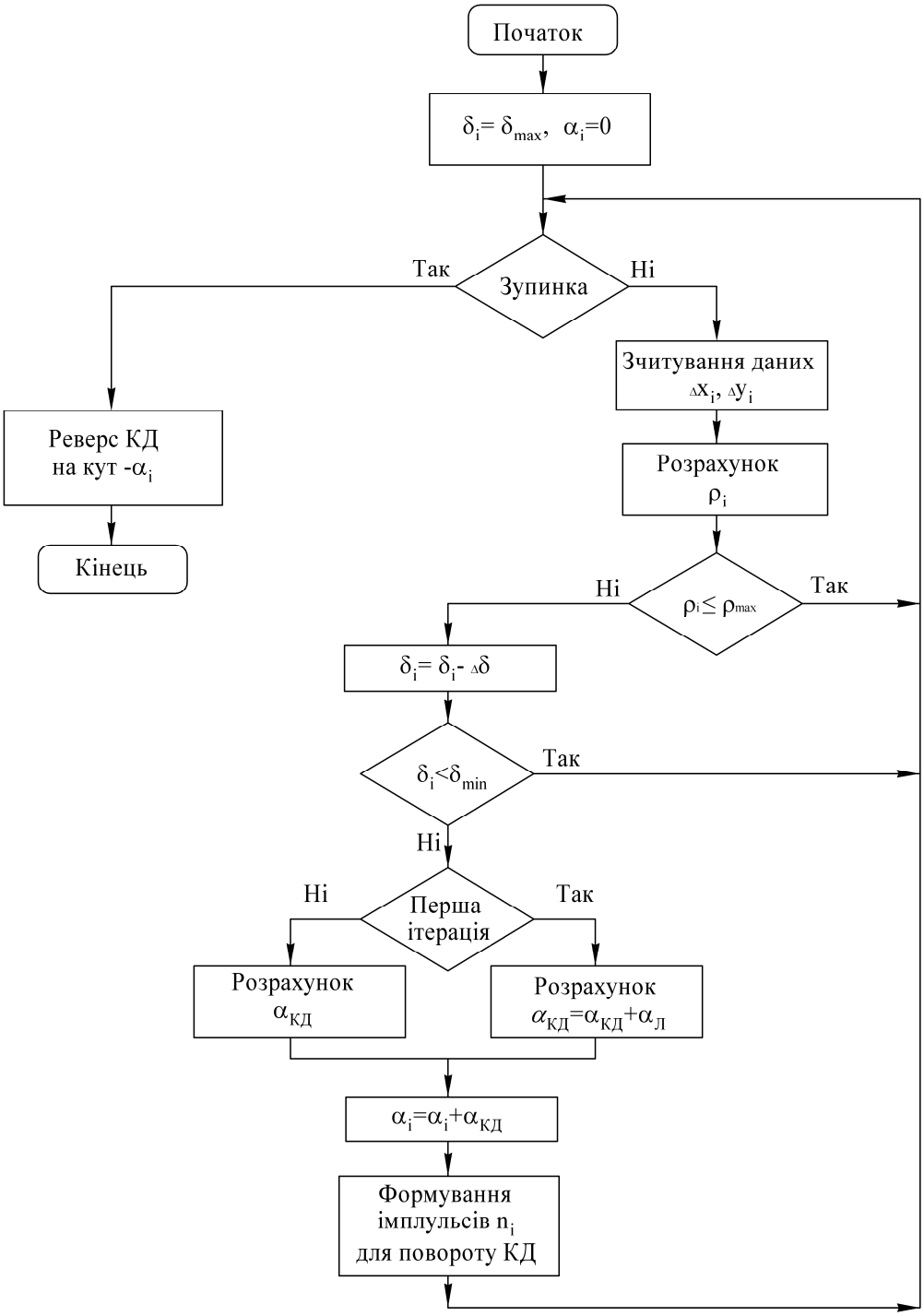


Рис. 5. Алгоритм керування регульованими ГСО шпинделя

Далі цикл коригування по δ_i повторюється. При всіх наступних ітераціях величина $\alpha_{КД}$ постійна й обчислюється за залежністю (1). Після закінчення процесу механічного оброблення, а також за технологічною необхідністю в алгоритмі керування передбачене повернення системи у вихідне положення, що відповідає реверсу зазору від значення δ_i до δ_{max}. У цьому випадку здійснюється безперервне реверсивне обертання вала крокового двигуна (на відміну від дискретного аверсного) на кут α_i при $\Delta\delta = \delta_{max} - \delta_i$ з урахуванням компенсації люфту в зубчастій передачі.

Сутність конструктивного способу компенсації люфту полягає у використанні беззазорних зубчастих передач.

Висновки. Показано, що цифрова САК положенням шпинделя на основі програмованого мікроконтролера з кроковим електродвигуном забезпечує високу швидкодію (до 1 с) та надійність за рахунок зменшення кінематичних ланцюгів привода порівняно з електрогідравлічною САК.

На основі імітаційного моделювання засобами системи Simulink встановлено, що САК з регулюванням геометричними параметрами опор шпинделя забезпечує підвищення запасу сталості у три рази щодо САК з регулюванням витрат рідини.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення адаптивної САК завдяки поєднанню окремих позитивних властивостей САК з регулюванням витратними характеристиками та геометричними параметрами опор. Такий підхід дозволить певним чином компенсувати недоліки окремих САК і підвищити точність обертання шпинделя.

Список використаних джерел

1. *Шатохин С. Н.* Теория и методы проектирования адаптивных гидростатических и аэростатических шпиндельных опор и направляющих металлорежущих станков : автореф. дис. … д-ра техн. наук : спец. 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин» / С. Н. Шатохин. – Красноярск, 2010. – 50 с.

2. *Моделювання* роботи шпиндельного вузла важкого токарного верстата з адаптивною системою живлення опор / В. Д. Ковальов, О. В. Пономаренко, М. С. Мельник та ін. // Вісник ЖДТУ. – 2009. – № 4 (51). – С. 37-43.

3. *Бушуев В. В.* Гидростатические опоры с адаптивным управлением / В. В. Бушуев, О. К. Цыпунов // Станки и инструмент. – 1987. – № 1. – С. 12-13.

4. *Регульовані* гідростатичні підшипники для шпиндельних вузлів / Ю. О. Сахно, Д. Ю. Федориненко, С. В. Бойко та ін. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2009. – 172 с.

5. *Бойко С. В.* Привод безступінчастого регулювання зазору в гідростатичних опорах для компенсації зміщень шпинделя : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / С. В. Бойко. – Чернігів, 2009. – 258 с.

6. *Зайцев В. П.* Проектирование адаптивных гидростатических подшипников / В. П. Зайцев, С. Н. Шатохин, С. А. Ярошенко // Весник машиностроения. – 1992. – № 6-7. – С. 25-28.

7. *Струтинський В. Б.* Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах : монографія / В. Б. Струтинський, Д. Ю. Федориненко. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2011. – 464 с.

8. *Петраков Ю. В.* Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю. В. Петраков. – К. : УкрНДІАТ, 2003. – 383 с.

9. *Устройства* и элементы систем автоматического регулирования и управления. Техническая кибернетика. Книга 3. Исполнительные устройства и сервомеханизмы / [П. В. Бирюков, А. Г. Боровков и др.] ; под ред. В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1976. – 735 с.

10. *Передачи* зубчатые цилиндрические мелкомодульные. Допуски: ГОСТ 9178-81. – [Действ. от 1982-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 39 с.

УДК 621.923.42

А.В. Рудик, канд. техн. наук
В.І. Венжега, канд. техн. наук
В.А. Рудик, магістр
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ТОРЦІВ

А.В. Рудик, канд. техн. наук
В.И. Венжега, канд. техн. наук
В.А. Рудик, магистр
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРЦОВ

A.V. Rudyk, Candidate of Technical Sciences
V.I. Venzheha, Candidate of Technical Sciences
V.A. Rudyk, master
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF THE ENDS BUTT FORMING

Запропоновано методику знаходження середньоквадратичної базової площини обробленої торцевої поверхні деталі. Ця методика не накладає обмежень на характер вимірювальної траєкторії та дозволяє оцінити як відхилення від перпендикулярності базової площини, так і знайти розсіювання точок обробленої плоскої поверхні щодо неї.

Ключові слова: *формоутворення, торцева поверхня деталі, шліфування.*

Предложена методика определения среднеквадратической базовой площади обработанной торцевой поверхности детали. Данная методика не накладывает ограничений на характер измерительной траектории и позволяет оценить как отклонение от перпендикулярности базовой плоскости, так и определить рассеивание точек обработанной поверхности относительно нее.

Ключевые слова: *формообразование, торцевая поверхность детали, шлифование.*

The method of determination of mean baseline machined face of the part. This technique does not impose restrictions on the nature of the measuring path and allows us to estimate the deviation from perpendicularity of the reference plane, and determine the dispersion of the points of the machined surface for her.

Kay words: *forming, the ends butt surface of detail, grinding.*

Постановка проблеми. Оброблення шліфуванням плоских торцевих поверхонь на двохсторонньому торцевошліфувальному верстаті моделі 3342 АДО є високоефективною. Порівняно з обробленням на плоскошліфувальних верстатах продуктивність значно зростає за рахунок менших витрат часу на встановлення деталей. Крім того, спосіб дозволяє проводити одночасне оброблення двох торців. Торцевошліфувальні верстати мають ще одну суттєву перевагу – вони можуть бути включеними до автоматичних ліній через скорочення частки ручної праці.

Проте збільшення продуктивності можна досягти, включивши торцеву поверхню абразивного інструменту в процес різання. З цією метою шліфувальні бабки з абразивним інструментом орієнтують у вертикальній та горизонтальній площинах.

Орієнтація у вертикальній площині відкриває торцеву поверхню круга для підведення припуску, що збільшує площу контакту та, відповідно, продуктивність оброблення. Для часткової компенсації похибок проводять також орієнтацію у горизонтальній площині. Це, однак, погіршує точність формоутворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формоутворенню торцевих поверхонь деталей присвячено багато наукових праць. Цією проблемою займалися В. В. Кальченко, Є. Н. Маслов, А. А. Маталін, В. І. Островський, М. Ф. Семко, С. С. Шахновський та інші.

Так, наприклад, у роботах [2; 3] вказано про створення нового ефективного способу шліфування кругами з комбінованою правкою та захищеними формотвірними ділянка-

ми. Однак метрологічне оцінювання обробленої поверхні є складним, придатним лише для круглих перерізів деталей.

Відомі результати робот [1; 7], де автори спільно працювали над удосконаленням методики оцінювання похибок оброблення. В цій роботі ці результати доповнено.

Виділення не вирішенних раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на велику кількість наукових праць, питання відповідності налагодження верстата та досягнення оптимальної точності формоутворення на ньому не має остаточного вирішення. Існує велика кількість рекомендацій, методик та технічних пропозицій. Саме тому завдання отримання високої точності оброблення при підвищенні продуктивності є актуальною для оброблення багатьох деталей машинобудування. Проведення та математичне оброблення вимірювань оброблених поверхонь сприяє її вирішенню.

Мета статті. Метою статті є визначення положення базової площини та проведення експериментальної перевірки відповідності встановлених теоретичних моделей точності формоутворення торців деталей на певній моделі верстата.

Виклад основного матеріалу. Для отримання оцінок точності розмірів, положення та форми обробленої поверхні необхідно побудувати метрологічну базу, за допомогою та відносно якої можна знайти ці оцінки. При обробленні торців нею слугує базова площина.

Розміри та положення базової поверхні залежать як від відхилень точок обробленої поверхні від номінальної, так і від її виду. Найбільш важливим видом базової поверхні є середньо квадратична [5].

Припустимо, що знайдені з профілограми координати N точок M1,M2, ...MN обробленої поверхні, які розташовані на колі, радіусом R траєкторії руху вимірювального пристрою кругломіру (для координат Xi, Yi; Zi з профілограми). Необхідно визначити шукані коефіцієнти a,b,d рівняння базової площини $Z=a\,X+b\cdot Y+d$.

Систему лінійних рівнянь, що описують положення базової площини, записують згідно з принципом Лежандра, використовуючи мінімум суми квадратів помилок [4]:

$$S=\sum_{u=1}^{N}\left[a\cdot X_i+b\cdot Y_i+d-Z_i\right]^2=\min, \tag{1}$$

$$\frac{\partial S}{\partial a}=\frac{\partial S}{\partial b}=\frac{\partial S}{\partial d}=0. \tag{2}$$

Систему, яка складається з трьох лінійних рівнянь, розв’язують відносно невідомих коефіцієнтів за допомогою матриць:

$$A\cdot K=B, \tag{3}$$

де $A=\begin{bmatrix}\sum\limits_N X_i\cdot X_i & \sum\limits_N X_i\cdot Y_i & \sum\limits_N X_i\\ & \sum\limits_N Y_i\cdot Y_i & \sum\limits_N Y_i\\ & & N\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}\sum\limits_N X_i\cdot Z_i\\ \sum\limits_N Y_i\cdot Z_i\\ \sum\limits_N Z_i\end{bmatrix}$ – матриці, стрічки яких складені з сум добутків та координат точок обробленої поверхні Mi(Xi, Yi, Zi);

K=[a b d]T – шуканий вектор коефіцієнтів базової площини, що визначається розв’язанням матричного рівняння

$$K=A^{-1}\cdot B. \tag{4}$$

Таким чином, рівняння базової площини має вигляд Z=a·X+b·Y+d,

або $a\cdot x+b\cdot y-1\cdot Z+d=0.$ (5)

Визначимо відхилення точок M1,M2, ...MN обробленої поверхні відносно базової площини, для чого сумістимо координатну XY і базову площини (рис. 1).

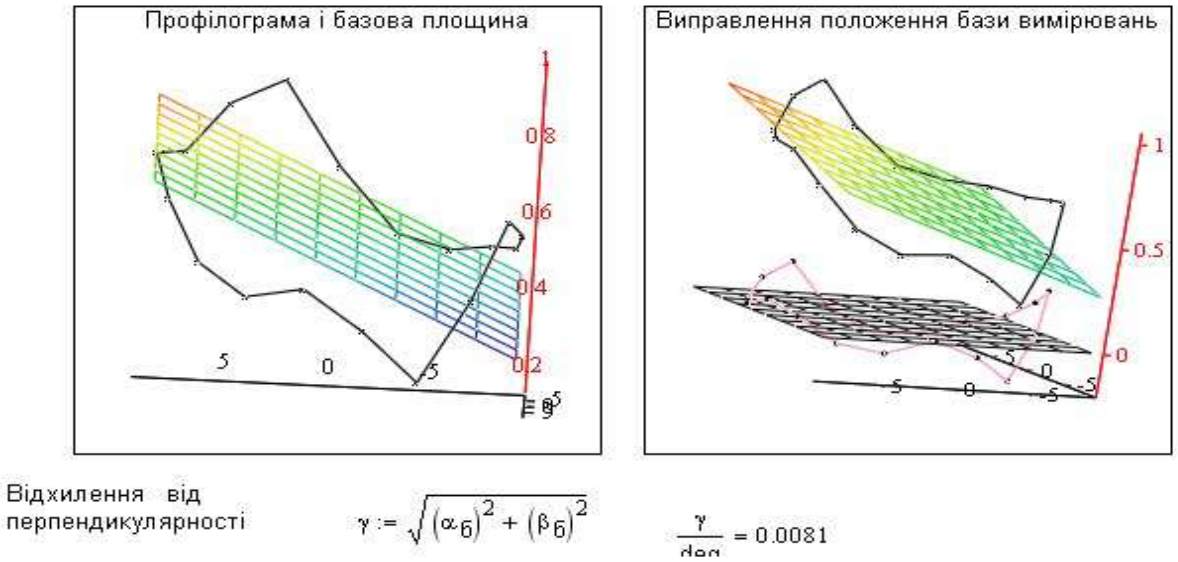


Рис. 1. Результати розрахунку положення базової площини до обробленої торцевої поверхні та її корекція

Матриця, яка відповідає похибкам положення базової площини, описується рівнянням (5). Елементи її δx, δy, γ можна не враховувати через те, що вони не призводять до зміни положення площини у просторі – «базова площина ковзає сама по собі».

Елементи αб, βб матриці εб відповідають кутовим похибкам навколо осей X та Y відповідно, а елемент – зсуву δz вздовж осі Z.

Ці елементи матриць визначають з рівнянь (рис. 2)

$$\alpha_б \approx \sin\alpha_б = \frac{b}{\sqrt{b^2+1}},$$
$$\beta_б \approx \sin\beta_б = \frac{a}{\sqrt{a^2+1}}. \qquad (6)$$

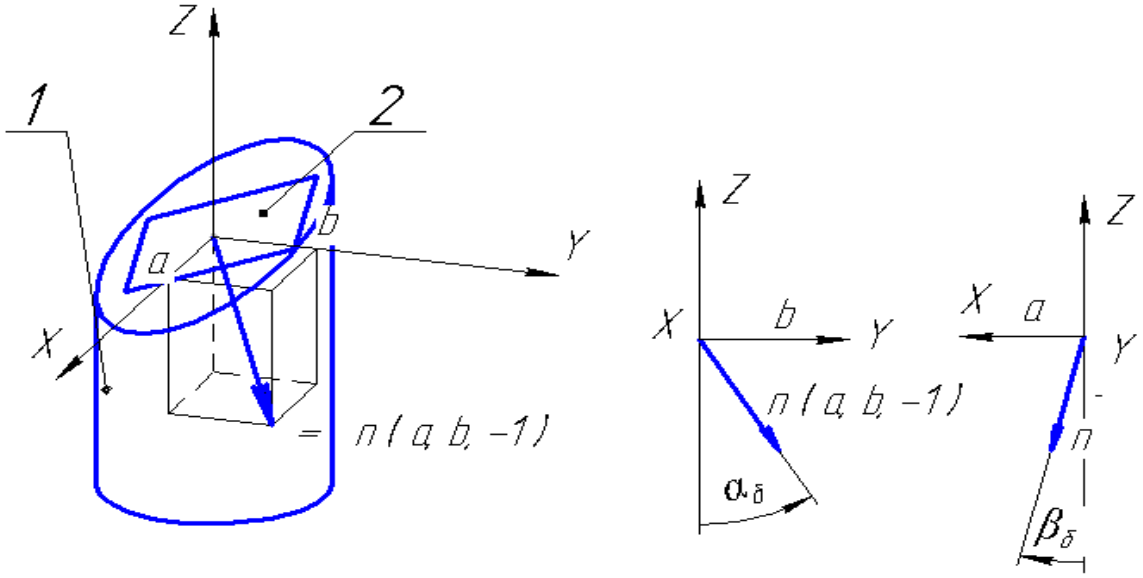


Рис. 2. Схема до визначення похибок положення базової площини:
1 – оброблена деталь; 2 – середньоквадратична базова площина

Відхилення від перпендикулярності базової площини та зсув її вздовж осі деталі визначають

$$\alpha_б^{\,2} + \beta_б^{\,2} = \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 + 1};\ \delta_z = \frac{d}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}. \tag{7}$$

Тоді матрицю єб похибок положення базової площини записують

$$\varepsilon_б = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta_б & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_б & 0 \\ -\beta_б & \alpha_б & 0 & \delta_{бz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Враховуючи дані величини зі зворотним знаком, можна корегувати положення базової площини як основи вимірювань:

$$\begin{aligned} \Delta\vec{r}_б &= \varepsilon_б \cdot \vec{r}_0 \\ \overrightarrow{r_{корег}} &= \vec{r}_0 - \Delta\vec{r}_б, \end{aligned} \tag{9}$$

де наведені вище вектори характеризують номінальне та дійсне положення обробленої торцевої поверхні.

Відхилення від площини визначають за різницею найбільшого й найменшого значень координат Z. Розсіювання вектора навколо базової площини визначають за допомогою стандартної функції середньоквадратичного відхилення у пакеті MathCAD.

З метою підтвердження методики на другій половині рис. 1 здійснена корекція положення базової площини разом із точками торцевої поверхні, координати яких введені згідно з профілограмою.

Проведені експериментальні дослідження точності формоутворення торців за допомогою кругломіра “TALYROOND” (рис. 3) підтвердили теоретичні розрахунки.

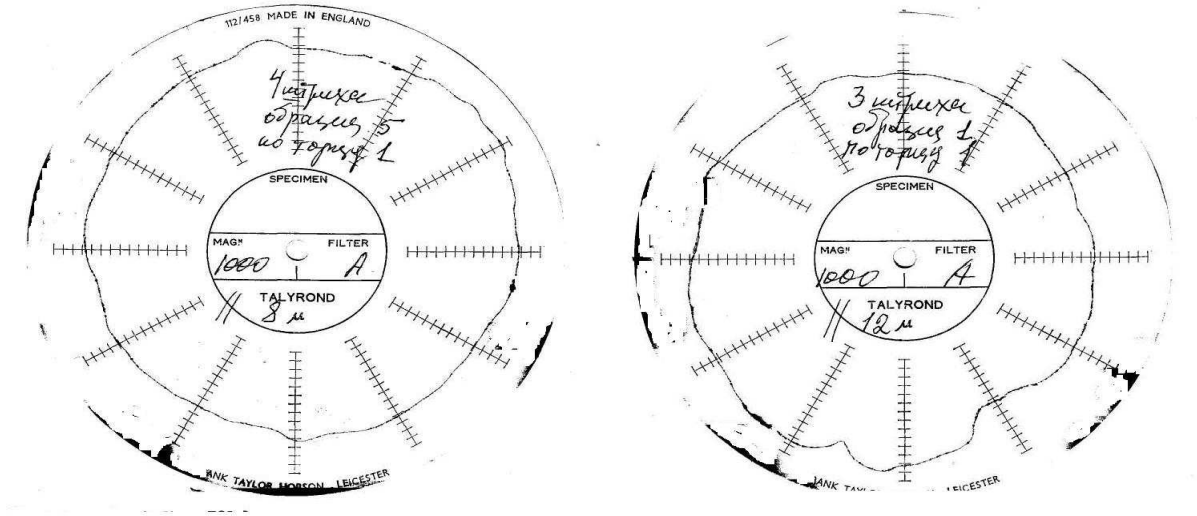


Рис. 3. Профілограми торцевого биття обробленої торцевої поверхні отримані на кругломірі TALYROOND

Сума квадратів координат всіх виміряних точок відповідає розсіюванню або дисперсії обробленої торцевої поверхні навколо базової площини.

Крім похибок положення базової площини, які оцінюють кутом $\sqrt{\alpha_б^2 + \beta_б^2}$, що відповідає відхиленню від перпендикулярності торця, вдосконалена математична модель. Вона дозволяє визначити міру розсіювання навколо базової площини через середньоквадратичне відхилення (або дисперсію) у функції вхідних похибок:

$$\sigma^2 = \frac{1}{S} \cdot \iint_s \left[\Delta r_n(\beta,\theta) - \Delta r_{б.n}(\beta,\theta)\right]^2 dS, \quad (10)$$

де в дужках наведена різниця квадратів проекцій на нормаль векторних похибок положення ланок та технологічної вихідної Δrб.n.(β,θ) у точці торця з координатами оброблення (β,θ), а відношення площин dS/S можна розглядати як елемент ймовірності.

Значення вхідної векторної похибки на нормаль Δrn(β,θ), яке характеризує зміщення ланок верстата відносно номінального положення, визначають з врахуванням знайдених передаточних коефіцієнтів ak подібно до виразів

$$\Delta r_n(\beta,\theta) = \sum_k a_k(\beta,\theta) \cdot q_k, \quad (11)$$

де qk – k-та вхідна похибка наладки верстата.

Висновки і пропозиції. Створена методика дозволяє порівнювати теоретично розраховані похибки з експериментально виміряними за допомогою профілографу. Дані виміру профілограм можуть бути одержані по довільній або декількох траєкторіях вимірювань та перевірені розрахунковим шляхом, що робить методику універсальною. Її можна застосовувати для порівняння різних методів оброблення площин як круглої, так і прямокутної форм.

Складені алгоритм та програми розрахунку в пакеті програм MathCAD по визначенню відхилень від площинності і перпендикулярності та матриці передатних коефіцієнтів між вхідними та вихідними похибками.

Отримані експериментальні результати не суперечать теоретичним. Похибка знаходиться в межах 10 %.

Список використаних джерел

1. *Венжега В. І.* Підвищення ефективності шліфування торців зі схрещеними осями деталі та круга із калібрувальною ділянкою : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. І. Венжега. – Х., 2008. – 25 с.

2. *Грабченко А. И.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧГТУ, 2009.– 356 с.

3. *Кальченко В. В.* Формоутворення торців циліндричних деталей, що не обертаються під час обробки, профічльованими і орієнтованими кругами / В. В. Кальченко, Г. В. Пасов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник. – Чернігів : ЧДТУ, 1999. – Вип. 9. – С. 11-17.

4. *Пискунов Н. С.* Дифференциальное и интегральное исчисление : учебник : в 2-х т. / Н. С. Пискунов. – СПб. : Мифрил. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1996.

5. *Решетов Д. Н.* Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.

6. *Рудик А. В.* Вплив похибок наладки верстату моделі 3342 АДО на похибки формоутворення плоских поверхонь / А. В. Рудик // Вестник национального технического университета "ХПИ". – Х. : ХДПУ, 2011. – Вип. 53. – С. 94-106.

7. *Рудик А. В.* Формоутворення торців деталей автомобілів при двосторонньому шліфуванні / А. В. Рудик, В. І. Венжега // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник. – Чернігів : ЧДТУ, 2008. – Вип. 34. – С. 80-89.

8. *Шахновский С. С.* Погрешности торцов колец подшипников при двустороннем плоском шлифовании / С. С. Шахновский // Станки и инструмент. – 1983. – № 1. – С. 27-30.

УДК 621.9.06

В.М. Чуприна, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ДИНАМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ВЕРСТАТІВ ТА ЇХ ВУЗЛІВ ЗА МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ У САПР

В.М. Чуприна, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СТАНКОВ И ИХ УЗЛОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В САПР

V.M. Chupryna, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

THE DYNAMIC CALCULATIONS OF TOOLS AND THEIR PARTS BY FINAL ELEMENT METHOD IN CAD

Розглянута актуальна проблема розрахунку динаміки пружної системи металорізального верстата за методом кінцевих елементів у САПР. На прикладі багатоопераційного верстата і його шпиндельного вузла запропоновано методику динамічного розрахунку з використанням 3D-моделей конструкцій. Наведені рекомендації щодо застосування цієї методики для розрахунку вихідних динамічних показників металорізальних верстатів.

Ключові слова: *динаміка, багатоопераційний верстат, шпиндельний вузол, САПР, 3D-модель, метод кінцевих елементів.*

Рассмотрена актуальная проблема расчета динамики упругой системы металлорежущего станка методом конечных элементов в САПР. На примере многооперационного станка и его шпиндельного узла предложена методика динамического расчета с использованием 3D-моделей конструкций. Приведены рекомендации по использованию данной методики для расчета выходных динамических показателей металлорежущих станков.

Ключевые слова: *динамика, многооперационный станок, шпиндельный узел, САПР, 3D-модель, метод конечных элементов.*

It is considered actual problem of the calculation speakers springy system metal cutting tool by final element method in CAD. On example machine centre tool and its spindle part methods of the dynamic calculation with use 3D-models design is offered. The recommendations on use given methodses for calculation of the output dynamic factors metal cutting tool are broughted.

Key words: *dynamics, machine centre tool, spindle part, CAD, 3D-models, final element method.*

Постановка проблеми. В умовах підвищеної конкуренції на ринку технологічного устаткування виробникам металорізальних верстатів необхідно забезпечувати найвищу якість виготовленої продукції. Для оцінювання якості верстатів застосовуються різні показники – точність, жорсткість, температурні деформації та інші. Також важливими показниками є динамічні показники, які забезпечують високу динамічну якість верстатів під час роботи.

Динамічна якість металорізального верстата визначається такими основними показниками: вібростійкістю, відхиленням при зовнішніх впливах і швидкодією системи [1]. Ці показники залежать не тільки від робочих процесів (різання, тертя в двигунах), але й великою мірою від якості механічної системи – пружної системи (ПС) верстата (або системи ВПІД: верстат-пристосування-інструмент-деталь).

Вихідні показники верстата можна одержати як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. Проте розрахунковий шлях є більш економним – він може застосовуватись ще на стадії проектування конструкції і не потребує виготовлення та випробування верстата для оцінювання його якості. При динамічних розрахунках верстатів можна отримати такі показники, як жорсткість (статичну і динамічну), спектр власних частот коливань, форми (моди) коливань й інші [2]. Це дозволяє знайти “слабкі місця” конструкції, усунути недоліки й оптимізувати її ще на стадії розроблення. Тому задача динамічного розрахунку верстата з метою оптимізації конструкції є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У верстатобудуванні питанням динамічних розрахунків верстатів приділяється велика увага [3-5]. Розроблені методики і програми для динамічних розрахунків верстатів і їх вузлів як з зосередженими (методи ди-

намічних жорсткостей, динамічних податливостей), так і з розподіленими (методи перехідних матриць, кінцевих елементів) параметрами.

На сучасному етапі розвитку ІТ-технологій все більшого розповсюдження набувають системи автоматизованого проектування (САПР) для створення різних технічних об'єктів, у тому числі металорізальних верстатів [6]. Для визначення вихідних параметрів якості об'єкта під час проектування використовується прототипування конструкцій у вигляді 3D-моделей − електронних тривимірних твердотільних моделей. 3D-модель по суті є математичним описом реального об'єкта, в якому кожний елемент конструкції (лінія, поверхня, тіло) описаний математичними залежностями. Тому усі необхідні розрахунки при моделюванні верстатів у САПР доцільно виконувати з використанням розроблених 3D-моделей.

Сучасний математичний апарат дозволяє розглядати складні об'єкти як системи з розподіленими параметрами, які описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних. На сьогодні найбільш поширеним методом розв'язку таких задач є метод кінцевих елементів (МКЕ) [7]. Він відноситься до діакоптичних методів дослідження систем по частинах (елементах) [8]. МКЕ може ефективно використовуватись для динамічних розрахунків різноманітних конструкцій, у тому числі і верстатів [5]. Він дозволяє виконувати розрахунок й оптимізацію статичних і динамічних показників верстатів у САПР на основі матмоделювання з використанням 3D-моделей конструкцій.

Зазвичай для континуальних систем такі задачі вирішується за допомогою чисельних методів, наприклад, у спеціальних програмних пакетах типу ANSYS, ABAQUS, NASTRAN.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проте металорізальний верстат являє собою складну механічну складальну конструкцію з великою кількістю елементів (деталей і вузлів), виконаних з різних матеріалів, які з'єднуються між собою в місцях контакту (в стиках) точковими, прямо- і криволінійними, плоско- і неплоскоповерхневими пружно-демпфіруючими зв'язками, що значно ускладнює розрахунки за МКЕ. В цьому випадку можна застосувати методи діакоптики, як це запропоновано в роботі [9].

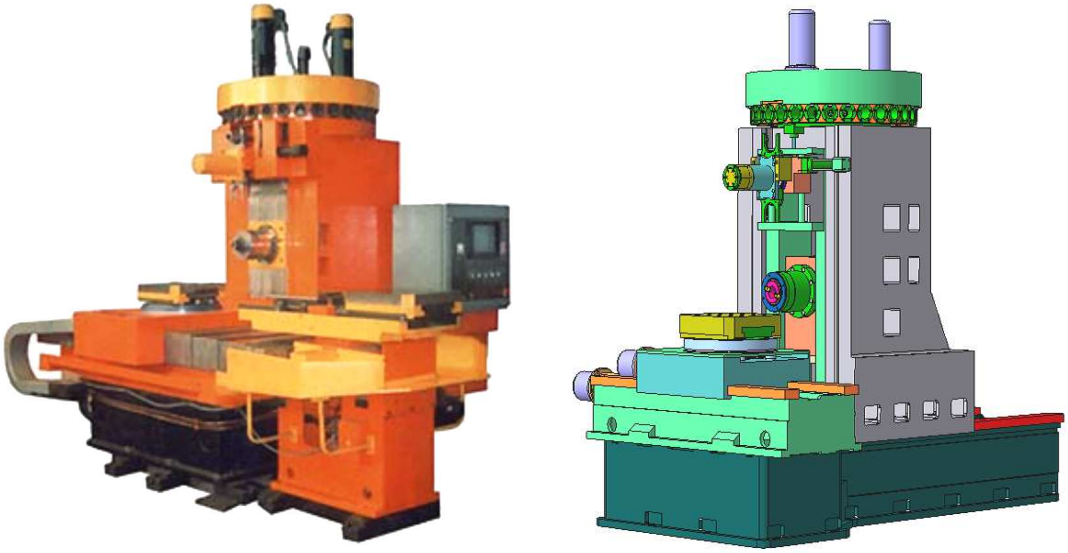
Достатньо розвинуті рішення контактних задач при інженерних розрахунках складних багатокомпонентних збірних конструкцій запропоновані в CAD-CAE-системі SolidWorks/CosmosWorks [10]. Тому в цій роботі ця система обрана як основна для розрахунку динаміки верстатів з використанням МКЕ.

Мета статті. Головною метою цієї статті є розроблення методології розрахункових досліджень динаміки пружних систем металорізальних верстатів та їх шпиндельних вузлів за методом кінцевих елементів у CAD-CAE-системі SolidWorks/CosmosWorks для оцінювання їх динамічних показників під час оптимізаційного проектування в САПР.

Виклад основного матеріалу. Усі дослідження виконувались на прикладі багатоопераційного верстата з ЧПК типу обробляючий центр моделі ИР500ПМФ4 з вбудованими комплектними шпиндельними вузлами. Загальний вид верстата показаний на рисунку 1, *а*, а 3D-модель його ПС − на рисунку 1, *б*.

Для проведення розрахунків у CAD-системі KOMPAS-3D створена детальна твердотільна 3D-модель механічної (пружної) системи верстата (без огороджень, кожухів, станції завантаження і т.ін.). 3D-модель розроблена на базі заводських креслень і містить більше 3000 елементів (деталей).

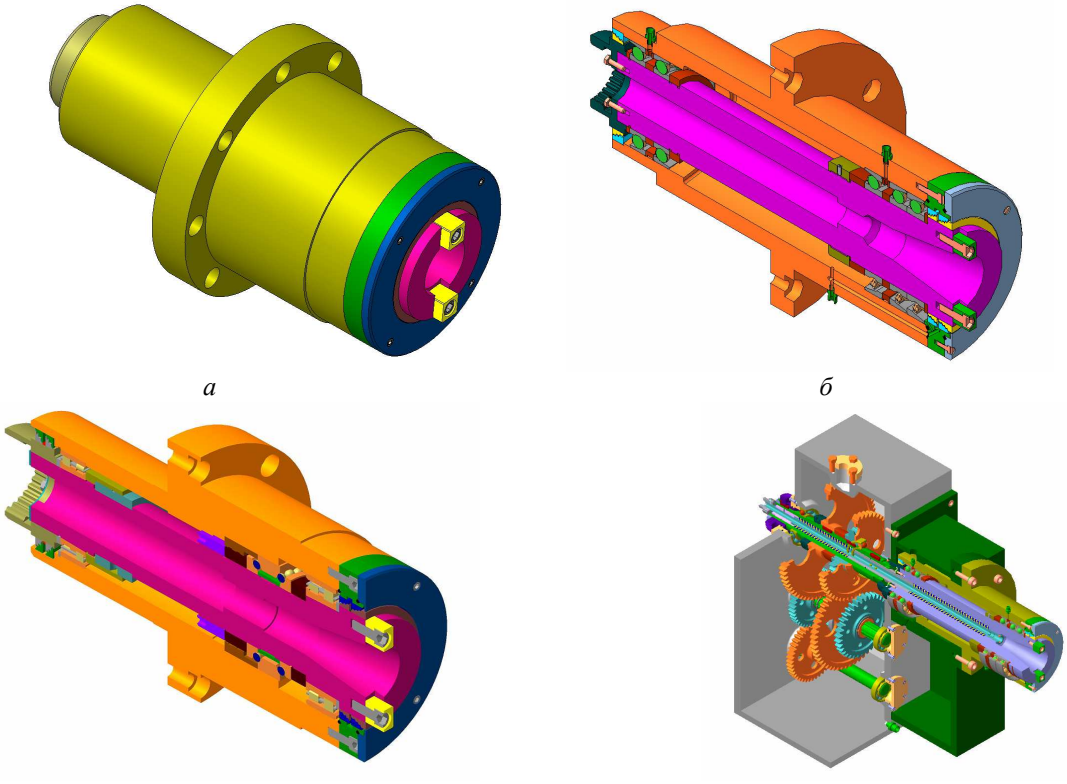
Конструкція багатоопераційного верстата ИР500ПМФ4 має практично модульну структуру і містить окремі вузли (суперелементи): шпиндельний вузол (ШВ), коробку швидкостей, повздовжній стіл, поворотний стіл, палету, магазин, автооператор.



а *б*

Рис. 1. Загальний вид обробляючого центру моделі ИР500ПМФ4:
а – зовнішній вигляд (фотографічне зображення); б – 3D-модель пружної системи (ПС)

Одним з найбільш важливих вузлів конструкції є ШВ, який до 30-70 % визначає динамічну якість верстата. Його конструкція виконана у вигляді збірної комплектної одиниці: шпиндель на двох підшипникових опорах, закріплений у власному корпусі (типу “гільза”). Для розширення технологічних можливостей верстата в його конструкції застосовані модернізовані комплектні шпиндельні вузли (КШВ) як швидкісних, так і силових варіантів виконання (за принципом агрегатування конструкції вони є взаємозамінні). Окремі варіанти розроблених 3D-моделей КШВ показані на рисунку 2.



а *б*

в *г*

Рис. 2. Варіанти 3D-моделей комплектного шпиндельного вузла (КШВ):
а – загальний вигляд; б – швидкісний варіант; в – силовий варіант; г – монтаж КШВ у шпиндельній бабці

Конструкції відрізняються в основному різними типами підшипників кочення в опорах шпинделя і використовуються залежно від необхідного технологічного призначення, яке пов'язане зі швидкохідністю і жорсткістю КШВ.

У швидкісних варіантах використовуються кулькові радіально-упорні підшипники серії 46000, причому в передній опорі вони встановлюються за схемами "дуплекс", "триплекс", "кварто", а в задній – за схемою "дуплекс", що забезпечує нормальну роботу КШВ при частотах обертання шпинделя від 3500 до 6000 об/хв.

У силових варіантах в обох опорах застосовані роликові підшипники з конічними роликами типу Gamet зі швидкістю обертання до 2000 об/хв або дворядні роликові підшипники з короткими роликами серії 3128000, які дозволяють швидкість до 4500 об/хв. Осьова фіксація шпинделя в останньому варіанті забезпечується упорно-радіальним підшипником серії 234000, який встановлений у передній опорі.

Посадочні розміри шпинделя під підшипники у всіх варіантах однакові: 100 мм – у передній опорі і 90 мм – у задній опорі. Розвинуті опори двох варіантів виконання ШВ, а також скорочена на 10-20 % "база" (відстань між опорами шпинделя) забезпечує більш високі динамічні показники конструкцій, що підтверджено результатами їх досліджень.

Метою динамічного розрахунку є отримання певних показників та характеристик ПС верстата у формі статичних деформацій, спектра власних частот, мод коливань на основних резонансних частотах, а також величин амплітуд змушених коливань верстата в зоні різання від зовнішнього навантаження силами різання (діючими як сили різання).

Слід зазначити, що система KOMPAS-3D не має власного модуля розрахунку за МКЕ. Тому для здійснення такого розрахунку використовувалась система CosmosWorks.

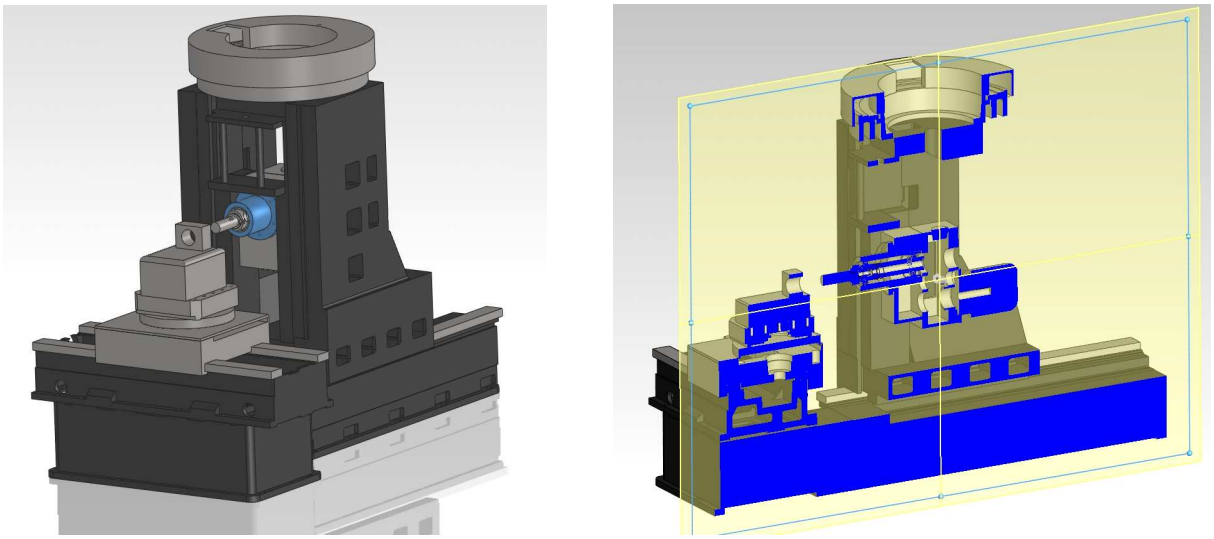
Програмний комплекс SolidWorks/CosmosWorks широко застосовується для автоматизованого проектування, розрахунків за МКЕ й оптимізації різних конструкцій.

Однак для цієї 3D-моделі розрахунки в програмі CosmosWorks ускладнені з таких причин: 1) власні формати систем KOMPAS-3D і SolidWorks взаємно не підтримуються; 2) при застосуванні загальних обмінних форматів втрачаються параметричні зв'язки (дерево побудови) і більшість атрибутів (матеріали, кольори й інші); 3) імпортовані об'єкти не можна редагувати; 4) детальну модель складно розбити на кінцеві елементи, а її розрахунок є досить тривалим ("непідйомним"). Тому для динамічного розрахунку в програмі CosmosWorks 3D-моделі спрощувались і перебудовувались у системі SolidWorks.

При спрощенні 3D-моделі основним критерієм була адекватність моделі, тобто відповідність її параметрів реальній конструкції верстата. Спрощення виконувалось на основі досвіду попередніх чисельних розрахунків динаміки ПС верстатів. Одночасно виконувалось укрупнення елементів через поєднання дрібних деталей з іншими для збереження масово-інерційних і жорсткісних параметрів. Окремі дрібні елементи не враховувались, якщо це практично не впливало на результати розрахунку.

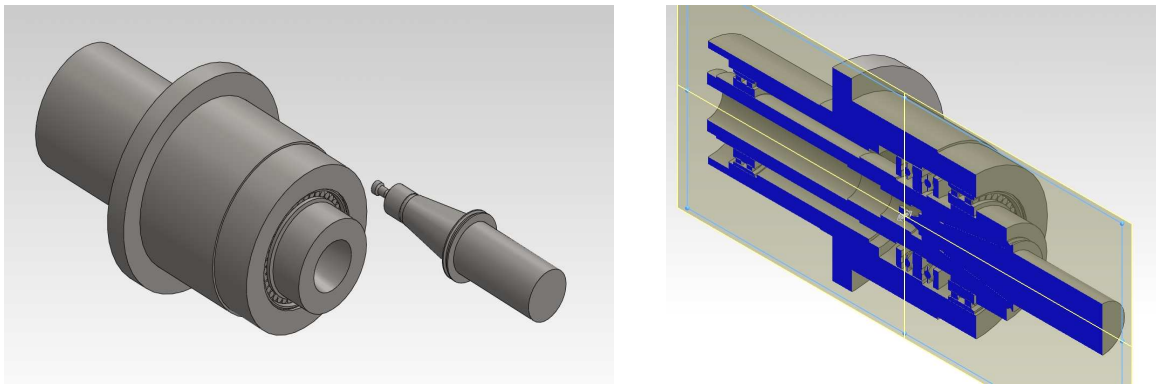
Спрощена 3D-модель ПС металорізального верстата ИР500ПМФ4 побудована в програмі SolidWorks. Її загальний вигляд показаний на рисунку 3. На рисунку 4 також наведена спрощена модель КШВ (силовий варіант).

У програмі CosmosWorks для розбиття об'ємних тіл на кінцеві елементи використовуються тривимірні кінцеві елементи – тетраедри з ребрами, що апроксимуються лінійними чи параболічними функціями. Вони дозволяють забезпечити високу точність розрахунків і наближеність результатів до параметрів реальних об'єктів. При цьому створюється гетерогенна мережа кінцевих елементів з різними за розмірами елементами. При аналізі збірних конструкцій побудова мережі визначається структурою контактних граничних умов.



а *б*

Рис. 3. Спрощена 3D-модель металорізального верстата ИР500ПМФ4:
а – 3D-модель верстата (в ізометрії); б – 3D-модель у розрізі (площиною симетрії)



а *б*

Рис. 4. Спрощена 3D-модель КШВ (з оправкою): а – загальний вид; б – вид у розрізі

Пакет CosmosWorks характеризується широкими функціональними можливостями по розрахунку й аналізу складних збірних конструкцій. Збірні одиниці можуть містити вузли з будь-якою кількістю деталей з різними властивостями матеріалів і характеристик. Можна задавати різну щільність мережі кінцевих елементів і її нерівномірність. Також існує можливість ручного розбиття мережі й ущільнення її в місцях концентрації напружень.

У пакеті підтримуються всі типи граничних умов (навантажень), у тому числі інерційні і гравітаційні. Для стиків деталей вирішується контактна задача для 3D-тіл з невідомою межею контакту. Моделювання збірних конструкцій виконується із завданням контактних граничних умов різних типів, враховуючи контактні граничні умови з тертям. Демпфірування в конструкції задаєтья переважно по Релею, або як модальне.

Програма має розширену функціональність при обробленні результатів розрахунків. Передбачена збільшена візуалізація деформованого стану як звичайна, так і на фоні вихідної моделі, або в перетинах. Також можливо створити анімацію результатів розрахунків.

При розрахунках у пакеті CosmosWorks розв’язуються різноманітні задачі аналізу конструкцій. Зокрема, в цій роботі на різних етапах її виконання застосовувались такі види досліджень:

− статичні дослідження, в яких обчислювались переміщення, сили реакції, навантаження, напруги й розподіл запасу міцності конструкції;

− частотні дослідження, де розраховувались власні частоти й асоційовані форми коливань конструкції;

− динамічні дослідження, в яких обчислювались реакції моделі, викликані прикладеними навантаженнями (раптово, або мінливими згодом, чи по частоті).

Методика

Згідно з МКЕ описувана область (об'єкт) розбивається на підобласті, топологічно пов'язаних між собою, причому усередині підобластей характеристики, що враховуються, задаються простими функціями. Процес розподілу моделі на малі частини забезпечує створення мережі кінцевих елементів. При цьому вихідний об'єкт, як континуальна система з розподіленими параметрами і нескінченою кількістю ступенів волі, апроксимується сукупністю багатьох підсистем (кінцевих елементів) з кінцевою кількістю ступенів волі, з'єднаних між собою в окремих точках (вузлах). Як правило, для дискретизації на елементарні підобласті (кінцеві елементи) об'єкта, як об'ємного тіла, використовуються тетраедри (або інші фігури) із гранями, що описуються лінійними чи параболічними функціями координат. У кожному з кінцевих елементів невідома функція апроксимується поліномом невисокого ступеня (зазвичай до 6-го), який визначається його коефіцієнтами. Ці коефіцієнти можуть бути знайдені через значення функції у вузлах кінцевих елементів. Значення функції в будь-якій точці елемента інтерполюється зі значень у вузлах елементів.

Для кожного кінцевого елемента обчислюється матриця зв'язків між вузлами, що описують кінцевий елемент. Складається загальна система алгебраїчних рівнянь, що описують об'єкт у цілому, при цьому враховуються граничні умови (стан вузлів по краях області дискретизації) і початкові умови. Розв'язок цієї системи дає значення шуканої функції в усіх вузлових точках мережі кінцевих елементів. При цьому чим більше елементів і чим краще вони описують задані властивості об'єкта, тим точніше виконується апроксимація. При розрахунках можливо проводити параметричну оптимізацію конструкції.

Послідовність динамічного розрахунку верстатів у програмі CosmosWorks (з оптимізацією конструкції) представлена у вигляді алгоритму, який показаний на рисунку 5.

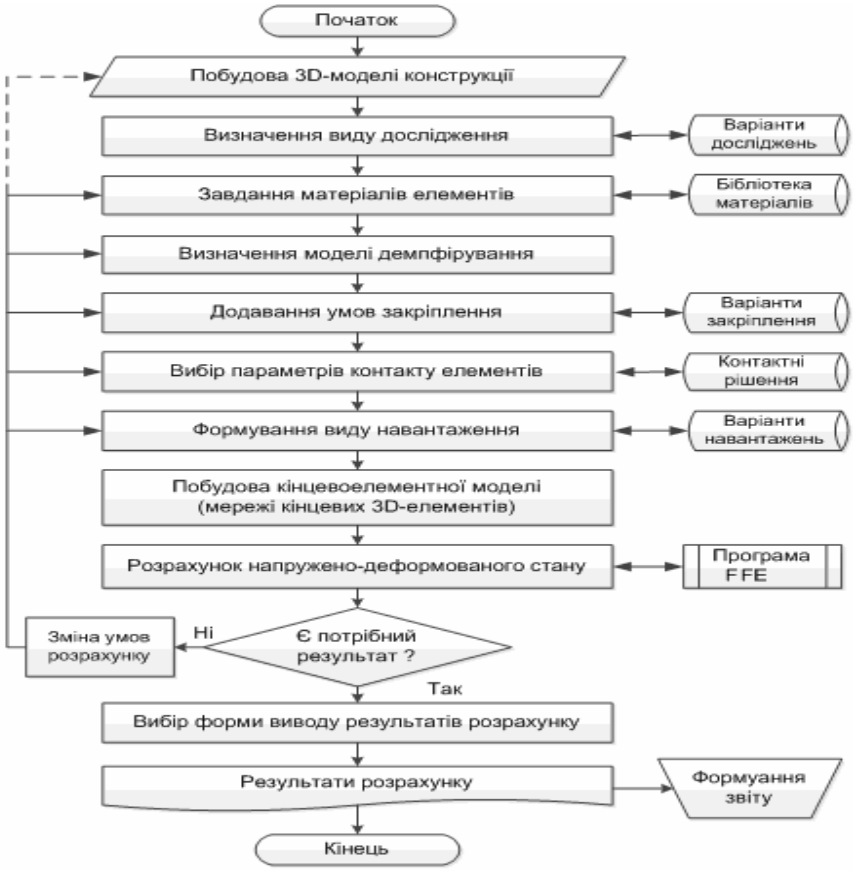
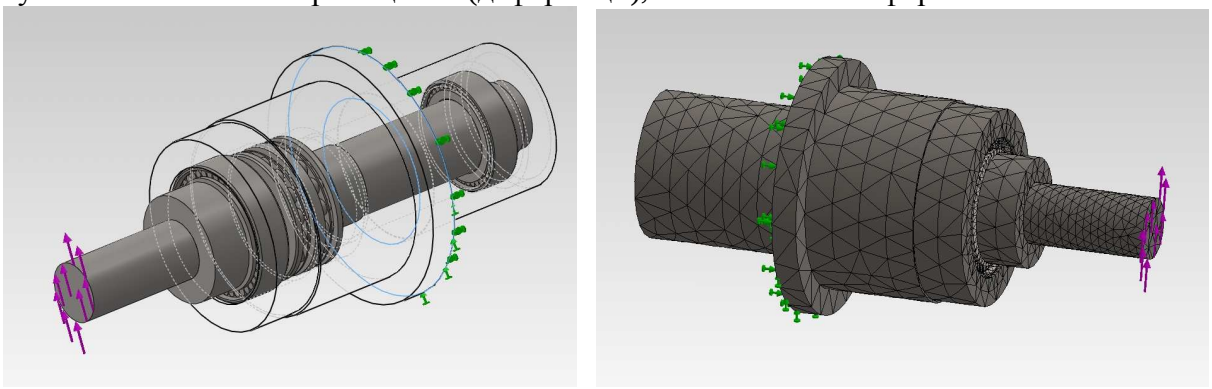


Рис. 5. Типова послідовність динамічного розрахунку за МКЕ

Розрахунки

З метою відпрацювання розрахункових моделей спочатку були проведені окремі динамічні дослідження КШВ на кулькових та роликових опорах.

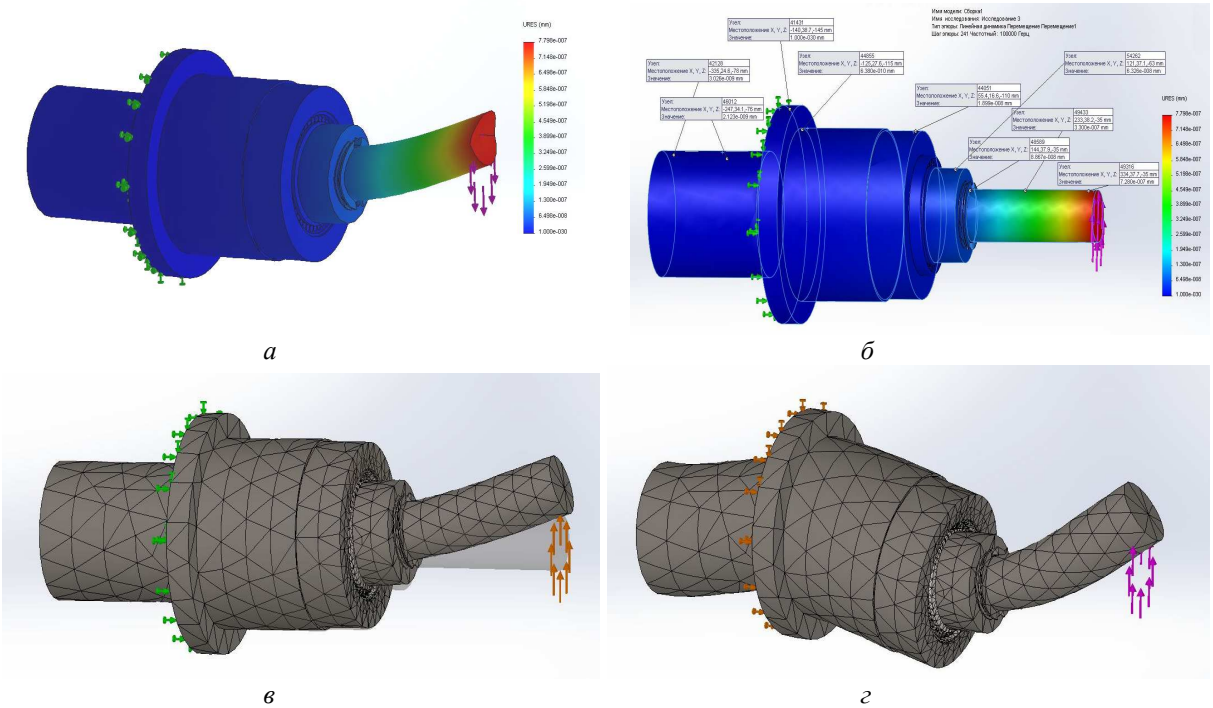
Приклад розрахункової моделі для силового варіанта КШВ (на роликових 2-рядних підшипниках серії 3182100) показаний на рисунку 6. Закріплення КШВ виконувалось по фланцю корпусу (як і при розміщненні на верстаті). Навантаження здійснювалось радіальною силою 1000 Н на консолі оправки (в зоні різання). При динамічних розрахунках визначались переміщення (деформації), власні частоти і форми коливань КШВ.



а *б*

Рис. 6. Розрахункові 3D-моделі КШВ: а – з прозорим корпусом; б – мережа кінцевих елементів

Для прикладу на рисунку 7 показані результати динамічного розрахунку силового варіанта КШВ (на підшипниках серії 3128000).



а *б*

в *г*

Рис. 7. Результати розрахунку силового КШВ: а – статичні деформації; б – зондування деформацій вздовж шпинделя; в – форма коливань на частоті 304 Гц; г – форма коливань на частоті 1657 Гц

У процесі досліджень змінювались різні параметри КШВ, зокрема діаметр і довжина шпинделя, жорсткість його опор (підшипників), виліт консолі й оправки та інші.

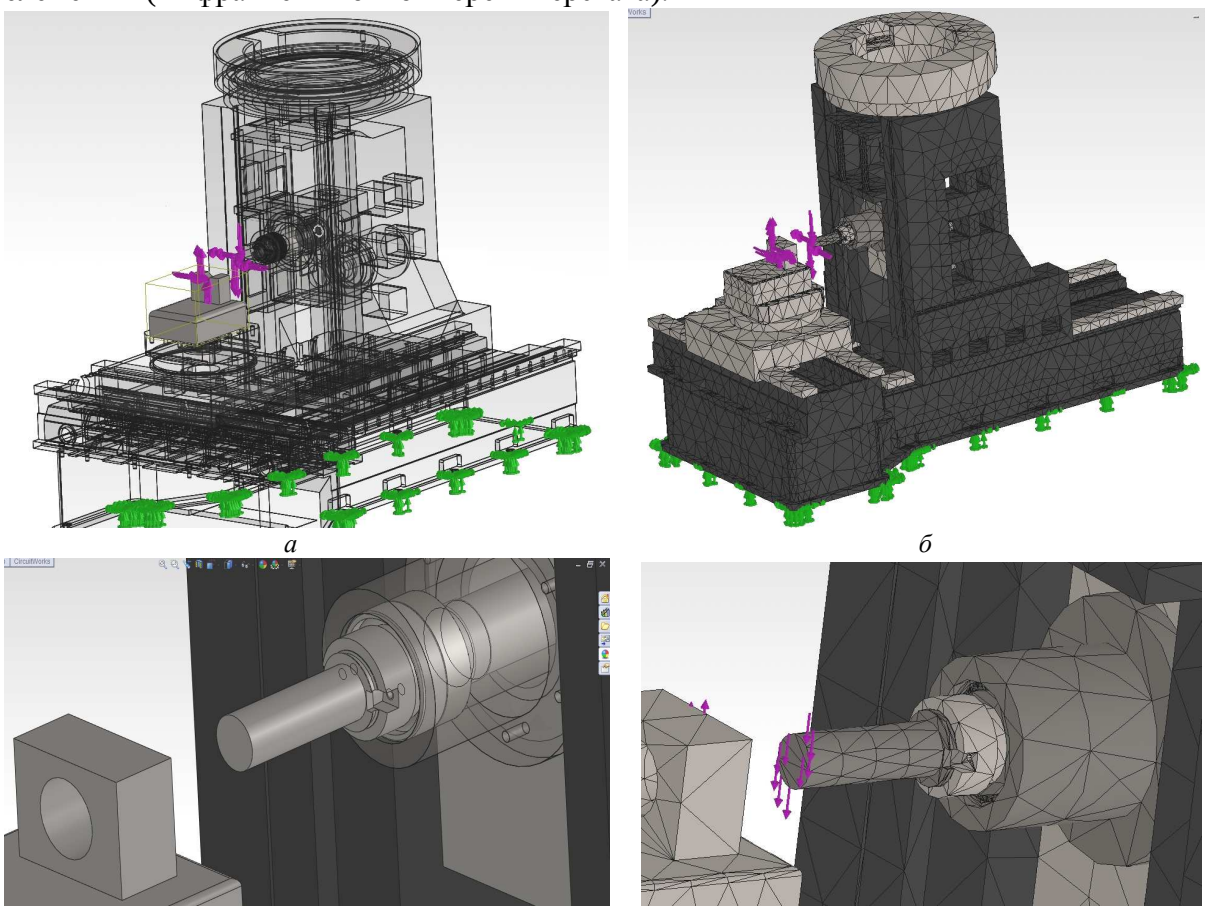
При розрахунках КШВ у програмі CosmosWorks виводились форми коливань шпинделя на основних резонансних частотах (рисунок 7, *в*, *г*), які зображені в збільшеному вигляді (шкала деформації 0.0982118) для наочності.

У результаті проведених досліджень були відпрацьовані розрахункові динамічні моделі КШВ та отримані необхідні статичні та динамічні характеристики і показники різних конструкцій.

Розглянуті варіанти КШВ вбудовувались у конструкцію верстата, як і оригінальний ШВ. Подальші динамічні розрахунки виконувались вже для повної ПС верстата.

Розрахункова модель верстата ИР500ПМФ4 представлена на рисунку 8, *а*. Закріплення моделі відповідає встановленню верстата на бетонну основу. Навантаження в зоні різання здійснювалось силами 1000 Н, прикладеними як на консолі оправки, так і на оброблювальній деталі (реакція сили) в різних напрямках.

На рисунку 8, *б* показана мережа кінцевих елементів повної пружної системи верстата, а на рисунках 8, *в*, *г* – розміщення КШВ у робочій зоні та мережа його кінцевих елементів (як фрагмент повної мережі верстата).



а *б*

в *г*

Рис. 8. Розрахункова 3D-модель ПС верстата ИР500ПМФ4:
а – з прозорими корпусними деталями; б – мережа кінцевих елементів верстата;
в – розміщення ШВ у робочій зоні; г – мережа кінцевих елементів ШВ

Динамічний розрахунок верстата ИР500ПМФ4 здійснювався в програмі FFEPlus з пакета CosmosWorks. Параметри і результати розрахунку наведені на рисунку 9 у вигляді таблиць.

Свойства исследования

Имя исследования	Исследование 2
Тип анализа	Линейный динамический анализ (Гармонический)
Тип сетки	Сетка на твердом теле
Количество частот	50
Тип решающей программы	FFEPlus
Мягкая пружина:	Выкл
Несовместимые параметры связи	Автоматические
Термический параметр	Включить тепловые нагрузки
Температура при нулевом напряжении	298 Kelvin
Включают эффекты давления жидкости из SolidWorks Flow Simulation	Выкл
Нижний частотный предел	0 Hz
Верхний частотный предел	100000 Hz
Количество частот	50
Интерполяция	Логарифмическая
Папка результатов	Документ SolidWorks (D:\SW_my\SW-model-IR500 - Расч_модель+ШУ_2рол_подш.)

Единицы измерения

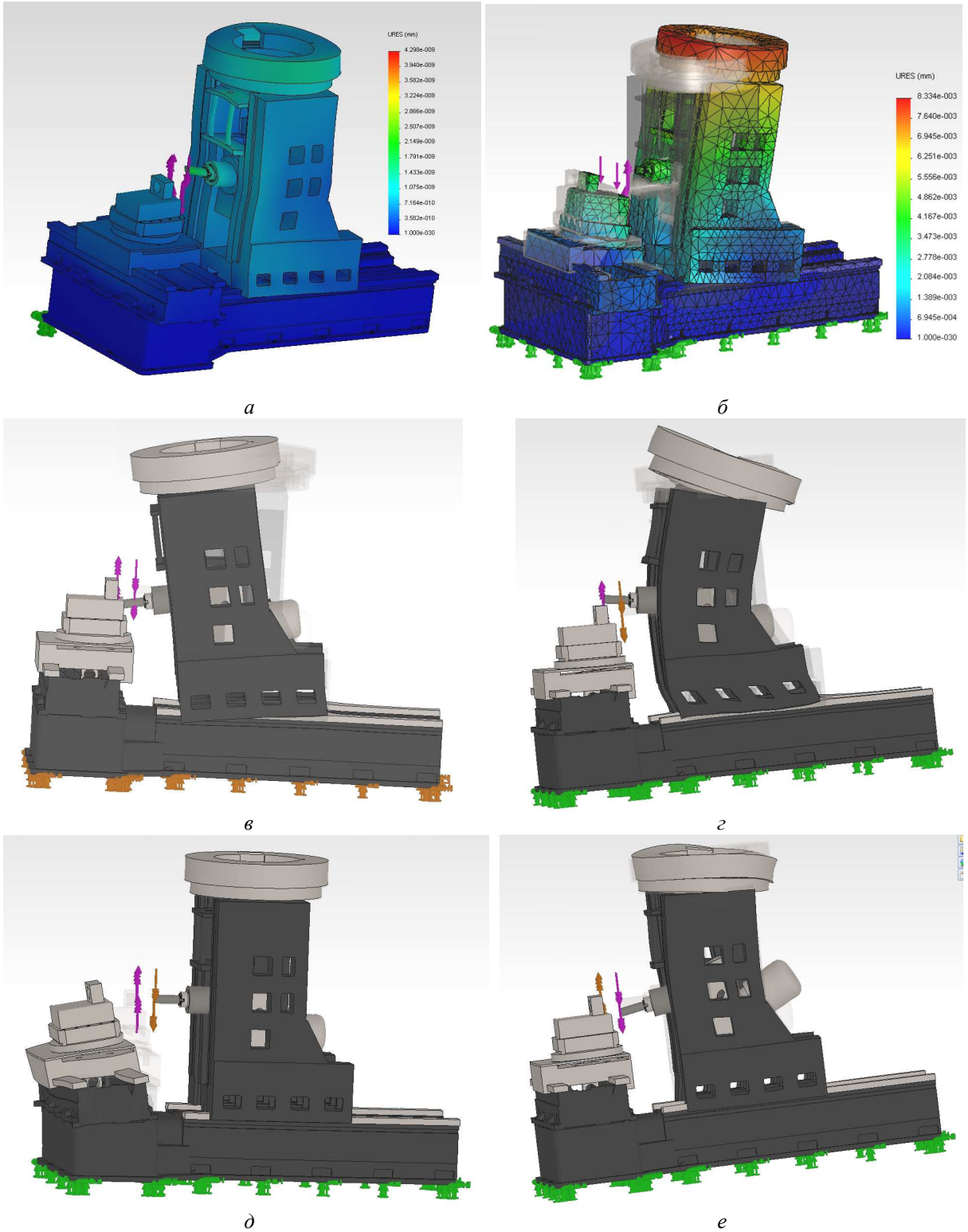
Система единиц измерения:	СИ (MKS)
Длина/Перемещение	mm
Температура	Kelvin
Угловая скорость	Рад/сек
Давление/Напряжение	N/m^2

Массовое участие (Нормализовано)

Номер режима	Частота(Герц)	Направление X	Направление Y	Направление Z
1	41.625	0.00064313	0.25729	0.00071487
2	55.337	0.24172	0.0010342	0.0010975
3	106.32	0.00037728	0.0083208	4.6928e-005
4	149.5	0.1112	0.00011002	0.0077386
5	164.25	0.0086766	0.0095556	0.34591
6	182.68	0.00018069	0.072137	0.0091744
7	199.12	0.12301	0.00060977	0.025271
8	223.67	0.00012815	0.11944	0.00043914
9	231.15	0.00043645	0.0060313	0.010936
10	251.26	0.012352	0.002325	0.00028314
11	256.68	9.4915e-005	0.0012319	3.2282e-007
12	261.79	0.00063618	0.0061866	2.2732e-005
13	280.99	0.00036913	0.00027651	0.0013263
14	296.75	5.2571e-005	0.0012552	0.012023
15	307.49	5.3904e-005	0.016509	0.00019383
...	...	...	...	...

Рис. 9. Параметри і результати розрахунку

На рисунку 10 показані статичні деформації та форми коливань верстата ИР500ПМФ4 на резонансних частотах ПС верстата. Порівняння деформацій на цих частотах з попередніми розрахунками по моделі верстата з зосередженими параметрами (рисунок 11) показали практичне співпадіння результатів, що підтверджує достовірність отриманих результатів.



а *б*

в *г*

д *е*

Рис. 10. Статичні деформації (а) і форми коливань верстата ИР500ПМФ4 на резонансних частотах 41Гц (б), 55Гц (в), 199Гц (г), 307Гц (д) та 401Гц (е)

На основі динамічних розрахунків КШВ і верстата встановлено, що частка динамічної податливості КШВ у динамічній податливості верстата становить до 60-80 % на резонансних частотах, які визначаються пружною системою КШВ (у діапазоні 300-800 Гц).

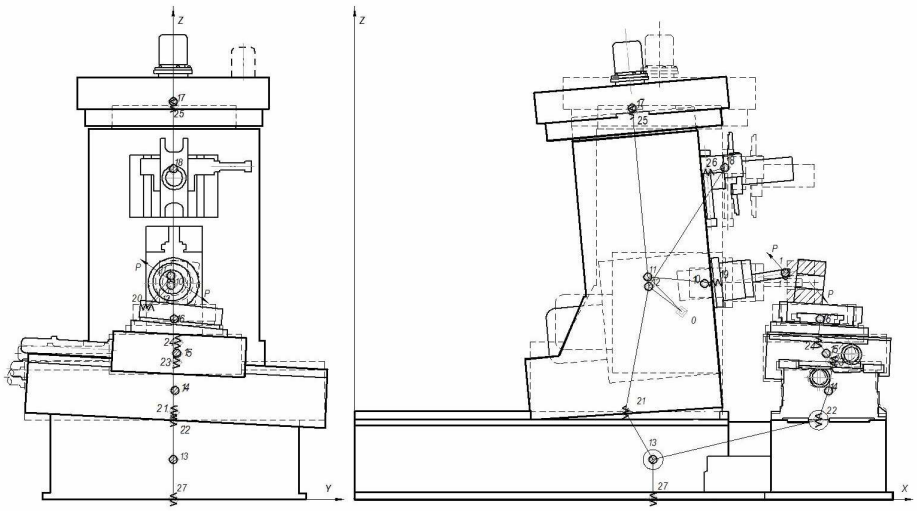


Рис. 11. Форми коливань верстата ИР500ПМФ4 на резонансній частоті 54Гц, розраховані по моделі з зосередженими параметрами

Висновки і пропозиції. Проектування нових металорізальних верстатів доцільно виконувати в системах САПР з розробкою 3D-моделей конструкцій. Це дає можливість проведення подальших розрахунків вихідних показників і моделювання з метою оптимізації. При цьому статичні і динамічні розрахунки верстатів та їх вузлів можна виконувати як традиційними методами, так і методом кінцевих елементів.

Розроблена методика динамічного розрахунку верстата з використанням 3D-моделей конструкцій дозволяє отримати необхідні статичні і динамічні показники пружної системи верстата, зокрема статичну жорсткість, власні частоти коливань, форми коливань верстата на основних резонансних частотах.

Наведені рекомендації щодо застосування цієї методики розрахунку дозволяють отримувати достовірні динамічні показники пружних систем різних верстатів і їх вузлів.

Розроблена методика динамічних розрахунків може бути застосована у спеціалізованих пакетах САПР металорізальних верстатів не тільки для оцінювання динамічної якості конструкцій, але і для їх оптимізації.

Список використаних джерел

1. *Кудинов В. А.* Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 360 с.

2. *Расчет* динамических характеристик упругих систем станков с ЧПУ : методические рекомендации / Е. В. Хлебалов, Т. С. Воробьева, Г. Я. Чумбуридзе, А. Д. Шустиков ; под ред. В. А. Кудинова. – М. : ЭНИМС, 1976. – 98 с.

3. *Кедров С. С.* Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. – М. : Машиностроение, 1978. – 199 с.

4. *Кирилин Ю. В.* Методика расчета виброустойчивости станков / Ю. В. Кирилин // СТИН. – 2005. – № 1. – С. 3-6.

5. *Кирилин Ю. В.* Расчет методом конечных элементов динамических характеристик несущей системы специального колесорасточного станка / Ю. В. Кирилин, Н. В. Еремин // Станки и инструмент. – М. : Машиностроение, 2009. – № 10. – С. 8-12.

6. *Норенков И. П.* Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И. П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 333 с.

7. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975.

8. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям – диакоптика / Г. Крон. – М. : Наука, 1972. – 544 с.

9. *Кудинов В. А.* Поузловой анализ динамических характеристик упругой системы станка / В. А. Кудинов, В. М. Чуприна. – М. : Станки и инструмент, 1989. – № 11. – С. 8-11.

10. *Алямовский А. А.* CosmosWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.

УДК 685.34.05

Д.А. Макатьора, асистент
Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПОГОННОГО ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ МІКРОПОРИСТОЇ ГУМИ НОЖЕМ ІЗ ДВОСТОРОННЬОЮ ЗАТОЧКОЮ

Д.А. Макатёра, ассистент
Киевський национальный университет технологий и дизайна, г. Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННОГО УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ МИКРОПОРИСТОЙ РЕЗИНЫ НОЖОМ С ДВУХСТОРОННЕЙ ЗАТОЧКОЙ

D.A. Makatyora, assistant
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF LINEAR CUTTING FORCE OF MICROPOROUS RUBBER WITH A KNIFE WITH DOUBLE-SIDED SHARPENING

Наведено результати дослідження впливу параметрів: величини зазору між валиками і величини відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа на погонне зусилля різання мікропористої гуми. Одержано рівняння регресії визначення сумарної величини втрат на процес повздовжнього різання (на транспортування та розрізання матеріалу) та величини втрат на тертя матеріалу (транспортування), що дозволяють розрахувати погонне зусилля різання мікропористої гуми ножем із двосторонньою заточкою.

Ключові слова: *погонне зусилля, сумарна величина втрат, втрати на тертя матеріалу, валики, кромка леза ножа.*

Приведены результаты исследования влияния параметров: величины зазора между валиками и величины расстояния от вертикальной оси вращения валиков к кромке лезвия ножа на погонное усилие резания микропористой резины. Получены уравнения регрессии определения суммарной величины потерь на процесс продольного резания (на транспортировку и разрезание материала) и величины потерь на трение материала (транспортировку), позволяющие рассчитать погонное усилие резания микропористой резины ножом с двусторонней заточкой.

Ключевые слова: *погонное усилие, суммарная величина потерь, потери на трение материала, валики, кромка лезвия ножа.*

The author presents the research results of the effect such parameters as the value of the gap between the rollers and the value of the distance from the vertical axis of rotation of the rollers to the edge of a knife blade have on the linear cutting force of microporous rubber. Regression equation of determining the total value of losses in the process of longitudinal cutting (material transportation and cutting) has been obtained. Besides the author has determined the magnitude of losses due to material friction (transportation), which allows to calculate the linear cutting force of microporous rubber with a knife with double-sided sharpening.

Key words: *linear force, the total value of losses, material friction losses, rollers, edge of a knife blade.*

Постановка проблеми. Машини для вирівнювання та двоїння деталей низу взуття по товщині застосовуються для різання напівфабрикату, тобто розділення його по товщині для отримання двох і більш тонких деталей, придатних для застосування у взуттєвому і галантерейному виробництвах. У цьому велика перевага вирівнювання перед струганням шкір, при якому значна частина (30-50 %) шкіряної тканини перетворюється в малокорисну стружку [1]. Основна частина технологічного процесу вирівнювання або двоїння деталей низу взуття – це взаємодія валкового механізму і кромки леза ножа машини з матеріалом деталі, яка являє собою значний інтерес, оскільки впливає на якість оброблення деталі та енергетичні витрати [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з основних технологічних процесів оброблення деталей низу взуття є вирівнювання по товщині або двоїння. Ця операція виконується за допомогою повздовжнього різання деталей взуття. При цьому для реалізації процесу повздовжнього різання використовується нерухомий ріжучий інструмент. Авторами роботи [3] були проведені аналітичні та експериментальні дослідження процесу різання нерухомим ножем, які показали, що технологічна операція супроводжується дуже високими значеннями втрат на тертя, які досягають 60-70 % енергетичних витрат на виконання технологічної операції.

Виділення не вирішеної раніше частини загальної проблеми. Із розвитком засобів електричних вимірювань та методів тензометрії постає завдання перевірки достові-

рності отриманих раніше даних щодо визначення погонного зусилля, а також методики визначення погонного зусилля, описаного в роботах [3; 4].

Мета статті. Головною метою роботи є експериментальне визначення сумарних величин втрат та величини втрат на тертя матеріалу, що дозволяють розрахувати погонне зусилля різання мікропористої гуми ножем із двосторонньою заточкою, а також порівняльний аналіз отриманих раніше значень.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження як завершальна стадія проектування геометрії ріжучого інструменту в машинах для повздовжнього різання проводяться для визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми. Під час вирішення завдань, що поставлені у роботі, були використані сучасні засоби електричних вимірювань, сучасні методи тензометрії, експериментальні методи оброблення результатів експерименту. Для визначення погонного зусилля різання був проведений двофакторний експеримент для моделі дослідження:

$$y = F(x_1,\ x_2),$$

де y – критерій оптимізації, що визначає q_p; x_1 і x_2 – керовані параметри (фактори), що характеризують відповідно величину зазору між валиками h і величину відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа a.

Під час визначення q_p, як зазначалося, необхідно провести двократне оброблення деталі, при якому у ході її розрізання визначається сумарна величина витрат на оброблення P, а потім після розрізання матеріал складають разом і пропускають площиною з'єднання через ніж, та визначається величина витрат на тертя F. Таким чином, лише різниця цих значень, віднесена до величини ширини деталі, дає справжню величину погонного зусилля різання мікропористої гуми:

$$q_p = \frac{P - F}{B}. \qquad (1)$$

Планування експерименту проводилося з використання ротатабельного плану Бокса для двофакторного експерименту ($k_{1,2} = 2$), який рекомендується при $k_{1,2} \le 5$ [5].

Загальна кількість дослідів визначається за формулою [5]:

$$N_{1,2} = 2^2 + 2 \cdot 2 + 5 = 13.$$

Кодування, іменування значення факторів та інтервали їх варіювання наведені в табл. 1, значення яких визначалися за допомогою співвідношень:

$$x_1 = \frac{x_i - 4{,}35}{1};\ x_2 = \frac{x_j - 2{,}5}{0{,}5}. \qquad (2)$$

Таблиця 1

Таблиця рівнів та інтервалів варіювання діючих факторів, які підлягають дослідженню

Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання фактора
	-1,414	-1	0	+1	+1,414	
1	2	3	4	5	6	7
h – відстань між транспортуючими валиками, мм (x_1)	2,95	3,35	4,35	5,35	5,75	1
a – відстань між вертикальною віссю обертання транспортуючих валиків і кромкою леза ножа, мм (x_2)	1,8	2	2,5	3	3,2	0,5

Проведемо оброблення даних експерименту з визначення сумарної величини втрат при повздовжньому різанні матеріалу. Матриця планування двофакторного експерименту представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця планування двофакторного експерименту визначення сумарної величини втрат при повздовжньому різанні матеріалу

Номер досліду	Матриця планування		Робоча матриця			Дані до розрахунку	
	x_1	x_2	h	a	y_u	y_u	$(y_u-y_u)^2$
1	1	1	5,35	3	410	409,85	0,0224
2	-1	1	3,35	3	482	481,17	0,6968
3	1	-1	5,35	2	526	525,08	0,8423
4	-1	-1	3,35	2	584	582,40	2,5688
5	-1,414	0	2,95	2,5	548	547,60	0,1658
6	1,414	0	5,75	2,5	458	456,65	1,8186
7	0	-1,414	4,35	1,8	574	573,65	0,1259
8	0	1,414	4,35	3,2	422	420,61	1,9456
9	0	0	4,35	2,5	498	499,32	1,7448
10	0	0	4,35	2,5	500	499,32	0,4611
11	0	0	4,35	2,5	500	499,32	0,4611
12	0	0	4,35	2,5	500	499,32	0,4611
13	0	0	4,35	2,5	498	499,32	1,7448
					$\sum_1^{13}=6500$	$\sum_1^{13}\left(y_u-\bar{y}_u\right)^2=13{,}0594$	

Під час визначення числа вимірів для кожного досліду проводилося п’ять повторних вимірювань на нульовому рівні (досліди 9-13) і визначалося наближене значення середньоквадратичної похибки рівняння (1.10) [5]: $S_p = 1{,}118$.

Розрахункове значення критерію Стьюдента в цьому випадку: $t_{расч(P)} = 4{,}0001$.

Табличне значення критерію Стьюдента для $\alpha_B = 0{,}95$ і $n_1 = 5$ [2]. Тобто виконується умова: $t_{расч(P)} \geq t_{табл}$.

Отже, число вимірювань $n_1 = 5$ для кожного досліду є достатнім. Після проведення експерименту і розшифровки записів за допомогою тарувального графіка визначалося середнє значення п’яти повторних вимірювань критерію оптимізації по кожному досліду і дані заносилися в робочу матрицю планування (табл. 2).

У цьому випадку необхідно знайти значення коефіцієнтів регресії рівняння (3.36) [5]:

$$y_u = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2. \quad (3)$$

Для визначення цих коефіцієнтів використовувалися рівняння (3.32) - (3.35) і дані табл. 3.32 [5] для двофакторного експерименту: $\alpha_1 = 0{,}2$; $\alpha_2 = 0{,}1$; $\alpha_3 = 0{,}125$; $\alpha_4 = 0{,}25$; $\alpha_5 = 0{,}125$; $\alpha_6 = 0{,}187$; $\alpha_7 = 0{,}1$.

Звідси: $b_0 = 499{,}32$; $b_1 = -32{,}16$; $b_2 = -54{,}12$; $b_{12} = -3{,}5$; $b_{11} = 1{,}4$; $b_{22} = -1{,}1$.

Таким чином, рівняння (3) набуває вигляду:

$$y_u = 499{,}32 - 32{,}16 x_1 - 54{,}12 x_2 - 3{,}5 x_1 x_2 + 1{,}4 x_1^2 - 1{,}1 x_2^2. \quad (4)$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (4) перевіряється в такій послідовності.

Оскільки досліди дублювалися тільки в нульовій точці, то дисперсія адекватності згідно з рівнянням (4.48) [5]:

$$S_{ад}^2 = \frac{13{,}06 - 4{,}87}{3} = 2{,}73.$$

Дисперсія відтворюваності для цього випадку визначається за формулою (4.13) [5]:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{4{,}87}{4} = 1{,}22.$$

Знаючи число ступенів свободи для більшої ($f_{a\partial} = 3$) і меншої ($f_e = 4$) дисперсії [5], табличне значення критерію Фішера для 95 % довірчої ймовірності:

$F_{табл} = 6{,}59$.

Розрахункове значення критерію Фішера згідно з формулою (4.35) [5]:

$$F_{расч(P)} = \frac{2{,}73}{1{,}22} = 2{,}24 .$$

Порівняння табличного і розрахункового значень критерію Фішера показало, що рівняння (4) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0{,}95$, оскільки дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{расч(P)}$.

Значимість коефіцієнтів регресії в рівнянні (4) перевіряється з урахуванням рівнянь (4.26-4.29) і (4.30-4.33) і даних табл. 4.3 [5] для випадку, коли $k_1 = 2$. У цьому випадку: $a_8 = 0{,}2$; $a_9 = 0{,}125$; $a_{10} = 0{,}1438$; $a_{11} = 0{,}25$.

Отже: $S^2_{\{b_0\}} = 0{,}2 \cdot 1{,}22 = 0{,}244$ і $S_{\{b_0\}} = 0{,}494$; $S^2_{\{b_i\}} = 0{,}125 \cdot 1{,}22 = 0{,}1525$ і $S_{\{b_i\}} = 0{,}391$; $S^2_{\{b_{ii}\}} = 0{,}1438 \cdot 1{,}22 = 0{,}175$ і $S_{\{b_{ii}\}} = 0{,}418$; $S^2_{\{b_{ij}\}} = 0{,}25 \cdot 1{,}22 = 0{,}305$ і $S_{\{b_{ij}\}} = 0{,}552$.

Звідси із співвідношень (4.26-4.29) [5]:

$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 0{,}244 = \pm 0{,}488$; $\Delta b_i = \pm 2 \cdot 0{,}391 = \pm 0{,}782$; $\Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 0{,}418 = \pm 0{,}836$; $\Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 0{,}552 = \pm 1{,}104$.

Порівняння абсолютних величин коефіцієнтів регресії рівняння (4) і відповідних похибок щодо їх оцінювання показує, що з довірчою ймовірністю 0,95 можна вважати значимими всі коефіцієнти.

Рівняння (4) є рівнянням регресії, що описує сумарну величину втрат під час виконання повздовжнього різання матеріалу нерухомим ножем залежно від відстані між транспортуючими валиками (x_1) і відстані між вертикальною віссю обертання транспортуючих валиків і кромкою леза ножа (x_2).

Враховуючи вирази (2), перейдемо до іменованих величин:

$$y_u = 499{,}32 - 32{,}16\,(h - 4{,}35) - 54{,}12\left(\frac{a - 2{,}5}{0{,}5}\right) - 3{,}5\,(h - 4{,}35)\left(\frac{a - 2{,}5}{0{,}5}\right) + 1{,}4\,(h - 4{,}35)^2 - 1{,}1\left(\frac{a - 2{,}5}{0{,}5}\right)^2 .$$

Після спрощення рівняння прийме такий вигляд:

$$y_u = 686{,}83 - 39{,}96h + 2{,}55a - 1{,}75ah + 1{,}4h^2 - 4{,}4a^2 . \qquad (5)$$

Отриманий вираз (5) – експериментальна математична модель залежності величини сумарних втрат під час виконання повздовжнього різання від величини зазору між валиками і величини відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа.

Проведемо оброблення даних експерименту з визначення величини втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа. Матриця планування двофакторного експерименту представлена в табл. 3.

Таблиця 3

Матриця планування двофакторного експерименту з визначення величини втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа

Номер досліду	Матриця планування		Робоча матриця			Дані до розрахунку	
	x_1	x_2	h	a	y_u	y_u	$(y_u - y_u)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	5,35	3	322	321,51	0,2426
2	-1	1	3,35	3	390	391,27	1,6166
3	1	-1	5,35	2	438	435,77	4,9530
4	-1	-1	3,35	2	510	509,54	0,2130

Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
5	-1,414	0	2,95	2,5	468	465,76	5,0250
6	1,414	0	5,75	2,5	364	364,28	0,0807
7	0	-1,414	4,35	1,8	496	496,22	0,0495
8	0	1,414	4,35	3,2	334	331,82	4,7479
9	0	0	4,35	2,5	408	409,70	2,8913
10	0	0	4,35	2,5	410	409,70	0,0898
11	0	0	4,35	2,5	412	409,70	5,2882
12	0	0	4,35	2,5	410	409,70	0,0898
13	0	0	4,35	2,5	408	409,70	2,8913
					$\sum_{1}^{13}=5370$	$\sum_{1}^{13}\left(y_u-\bar{y}_u\right)^2=28{,}1787$	

Під час визначення числа вимірів для кожного досліду проводилося п’ять повторних вимірювань на нульовому рівні (досліди 9-13) і визначалося наближене значення середньоквадратичної похибки рівняння (1.10) [5]: $S_p = 1{,}118$.

Розрахункове значення критерію Стьюдента в цьому випадку: $t_{расч(P)} = 4{,}0001$.

Табличне значення критерію Стьюдента для $\alpha_B = 0{,}95$ і $n_1 = 5$ [5]. Звідси виконується умова: $t_{расч(P)} \geq t_{табл}$.

Отже, число вимірювань $n_1 = 5$ для кожного досліду є достатнім. Після проведення експерименту і розшифровки записів за допомогою тарувального графіка визначали середнє значення п’яти повторних вимірювань критерію оптимізації по кожному досліду і дані заносилися в робочу матрицю планування (табл. 3).

У цьому випадку необхідно знайти значення коефіцієнтів регресії рівняння (3.32) - (3.35) і дані табл. 3.32 [5] для двофакторного експерименту: $b_0 = 409{,}7$; $b_1 = -35{,}882$; $b_2 = -58{,}134$; $b_{12} = 1$; $b_{11} = 2{,}66$; $b_{22} = 2{,}16$.

Таким чином, рівняння (3) набуває вигляду:

$$y_u = 409{,}7 - 35{,}882\,x_1 - 58{,}1344\,x_2 + x_1\,x_2 + 2{,}66x_1^2 + 2.16x_2^2 . \qquad (6)$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (6) перевіряється у вищевикладеній методиці.

Дисперсія адекватності: $S_{ад}^2 = \dfrac{28{,}18 - 11{,}25}{3} = 5{,}643$.

Дисперсія відтворюваності для цього випадку: $S_{\{y\}}^2 = \dfrac{11{,}25}{4} = 2{,}81$.

Розрахункове значення критерію Фішера: $F_{расч(P)} = \dfrac{5{,}643}{2{,}81} = 2{,}01$.

Порівняння табличного і розрахункового значень критерію Фішера показало, що рівняння (6) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0{,}95$, оскільки дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{расч(P)}$.

Значимість коефіцієнтів регресії в рівнянні (6) перевіряли аналогічно, як у вищевикладеній методиці.

Отже: $S_{\{b_0\}}^2 = 0{,}2 \cdot 2{,}81 = 0{,}562$ і $S_{\{b_0\}} = 0{,}75$; $S_{\{b_i\}}^2 = 0{,}125 \cdot 2{,}81 = 0{,}351$ і $S_{\{b_i\}} = 0{,}592$; $S_{\{b_{ii}\}}^2 = 0{,}1438 \cdot 2{,}81 = 0{,}404$ і $S_{\{b_{ii}\}} = 0{,}636$; $S_{\{b_{ij}\}}^2 = 0{,}25 \cdot 2{,}81 = 0{,}7025$ і $S_{\{b_{ij}\}} = 0{,}838$.

Звідси із співвідношень (4.26-4.29) [5]:

$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 0{,}75 = \pm 1{,}5$; $\Delta b_i = \pm 2 \cdot 0{,}592 = \pm 1{,}184$; $\Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 0{,}636 = \pm 1{,}272$; $\Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 0{,}838 = \pm 1{,}676$.

Порівняння абсолютних величин коефіцієнтів регресії рівняння (6) і відповідних похибок щодо їх оцінювання показує, що з довірчою ймовірністю 0,95 можна вважати значимими всі коефіцієнти, крім b_{12}, тоді отримаємо:

$$y_u = 409{,}7 - 35{,}882x_1 - 58{,}134x_2 + 2{,}66x_1^2 + 2.16x_2^2 . \quad (7)$$

Рівняння (7) є рівнянням регресії, що описує сумарну величину втрат під час виконання повздовжнього різання матеріалу нерухомим ножем залежно від відстані між транспортуючими валиками (x_1) і відстані між вертикальною віссю обертання транспортуючих валиків і кромкою леза ножа (x_2).

Враховуючи вирази (2), перейдемо до іменованих величин:

$$y_u = 409{,}7 - 35{,}88(h - 4{,}35) - 58{,}13\left(\frac{a - 2{,}5}{0{,}5}\right) + 2{,}66(h - 4{,}35)^2 + 2{,}16\left(\frac{a - 2{,}5}{0{,}5}\right)^2 .$$

Після спрощення рівняння набуде такого вигляду:

$$y_u = 742{,}77 + 2{,}66h^2 - 59{,}02h + 8{,}64a^2 - 72{,}27a . \quad (8)$$

Отриманий вираз (8) – експериментальна математична модель залежності величини втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа під час виконання повздовжнього різання нерухомим ножем від величини зазору між валиками і величини відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа.

Отримані експериментальні моделі, а саме визначення сумарної величини втрат (5) та величини втрат на тертя матеріалу (8), дозволяють визначати погонне зусилля різання мікропористої гуми (1). Підставляючи значення в рівняння (1), отримаємо середнє значення погонного зусилля мікропористої гуми:

$$q_p = 2{,}56\,\frac{H}{мм},$$

для мікропористої гуми РПШ-4 "Мипора".

Відхилення від отриманих раніше значень роботи [3] становлять $\Delta = 8{,}98\%$.

Висновки та пропозиції. Отримані рівняння регресії, а саме визначення сумарної величини втрат при повздовжньому різанні матеріалу та величини втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа, дозволяють оперативно визначати погонне зусилля різання мікропористої гуми, ніж під час використання відомих методів.

Список використаних джерел

1. *Майзель М. М.* Машины и аппараты кожевенного и мехового производства / М. М. Майзель, И. К. Квяткевич, Л. Г. Пин. – М. : Гизлегпром, 1950. – 590 с.

2. *Князєв В. І.* Визначення похибки обробки при двоїнні деталей низу взуття / В. І. Князєв, В. С. Чорно-Іванов // Легка промисловість. – 1997. – № 1. – С. 59.

3. *Чорно-Іванов В. С.* Розробка механізму повздовжнього різання деталей низу взуття : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.10 / В. С. Чорно-Іванов. – К., 1998. – 18 с.

4. *Деклараційний* патент (України) 70012А. Спосіб визначення потужності, що витрачається на повздовжнє різання матеріалу / Д. А. Макатьора, В. І. Князєв ; опубл. в Бюл. «Промислова Власність», 2004, № 9.

5. *Тихомиров В. Б.* Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.354:541.428

Г.П. Болотов, д-р техн. наук
І.С. Бондаренко, магістр
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ПРЕЦИЗІЙНЕ ДИФУЗІЙНЕ ПАЯННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Г.П. Болотов, д-р техн. наук
И.С. Бондаренко, магистр
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ПРЕЦИЗИОННАЯ ДИФФУЗИОННАЯ ПАЙКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

H.P. Bolotov, Doctor of Technical Sciences
I.S. Bondarenko, master
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

PRECISION DIFFUSION SOLDER OF ALUMINUM ALLOYS

Досліджено вплив основних технологічних параметрів дифузійного паяння на міцність та деформаційні характеристики з'єднань сплавів алюмінію АМц. Як припій використовували рідку легкоплавку евтектику алюміній–мідь. Показано, що застосування у процесі паяння статичного та динамічного навантаження створює сприятливі умови для формування рівноважної дрібнозернистої структури паяного шва. Визначені оптимальні режими паяння, що забезпечують відносну деформацію зразків не вище 5 % при високих показниках міцності з'єднання.

***Ключові слова**: алюмінієві сплави, дифузійне паяння, прецизійне з'єднання.*

Исследовано влияние основних технологических параметров диффузионной пайки на прочность и деформационные характеристики соединений сплавов алюминия АМц. В качестве припоя использовали жидкую легкоплавкую эвтектику алюминий–медь. Показано, что применение в процессе пайки статического и динамического нагружения создает благоприятные условия для формирования равновесной мелкозернистой структуры паяного шва. Определены оптимальные режимы пайки, обеспечивающие относительную деформацию образцов не более 5 % при високих показателях прочности соединения.

***Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, диффузионная пайка, прецизионное соединение.*

The influence of the main technological parameters of diffusion soldering on the strength and deformation characteristics of the joints of aluminum alloys AMts. As the liquid solder used fusible evtektic aluminum-copper. It is shown that the use of a soldering process static and dynamic loading creates favorable conditions for the formation of equilibrium grain structure solder joint. The optimal regimes rations that provide a relative deformation of the samples did not exceed 5 % ind high performance bond strength.

***Key words**: aluminum alloys, diffusion soldering, precision joint.*

Постановка проблеми. Алюміній – це легкий, дуже пластичний метал. Унікальне поєднання його властивостей, серед яких – довговічність, непроникність, висока тепло- і електропровідність, стійкість до корозії і можливість стовідсоткової переробки – робить його незамінним компонентом для великої кількості промислової продукції – від побутової техніки до реактивного літака. Обсяги застосування алюмінію і його сплавів у виробництві безперервно збільшуються, до того ж темпи його росту значно вищі, ніж у чавуна та сталі. Багато задач по створенню сучасних машин і конструкцій вирішують тільки за допомогою алюмінієвих сплавів [1].

Широке застосування алюмінію та його сплавів майже у всіх галузях промисловості і техніки вимагає подальшого вдосконалення та розвитку існуючих технологічних процесів утворення нероз'ємних з'єднань окремих елементів, деталей, вузлів в єдину конструкцію за допомогою зварювання, паяння, склеювання та розроблення нових способів з'єднання.

Аналіз попередніх досліджень. Для з'єднання алюмінієвих сплавів широко застосовується дифузійне зварювання. Однак воно здійснюється із застосуванням достатньо значних зусиль стискання деталей (5…10 МПа) при температурі 723…823 К, що призводить до суттєвої деформації зварного вузла і необхідності наступного механічного оброблення. Більш ефективним для отримання прецизійних з'єднань пластичних металів слід вважати процес паяння.

Серед усіх способів з'єднань паяння металів з кожним роком набуває все більше поширення [2]. Його справедливо розглядають як один з найбільш прогресивних технологічних методів з'єднання деталей. Паяння дозволяє раціонально використовувати конструкційні матеріали, знижувати масу конструкцій, зменшувати затрати праці, покращувати зовнішній вигляд виробів, збільшувати їх міцність, особливо при знакозмінних і вібраційних навантаженнях, і забезпечувати високу якість і надійність у процесі експлуатації.

Нині паяння застосовується при виготовленні таких виробів з алюмінієвих сплавів, як стільникові панелі, радіатори різних систем охолодження, контейнери для космічних апаратів, оболонки тепловиділяючих елементів реакторів, теплообмінники та реактори силових установок, обертаючі диски турбін паливно-насосних агрегатів для реактивних двигунів, вакуумні прилади, радіоелектронна апаратура, хвилеводи, трубопроводи та ін.

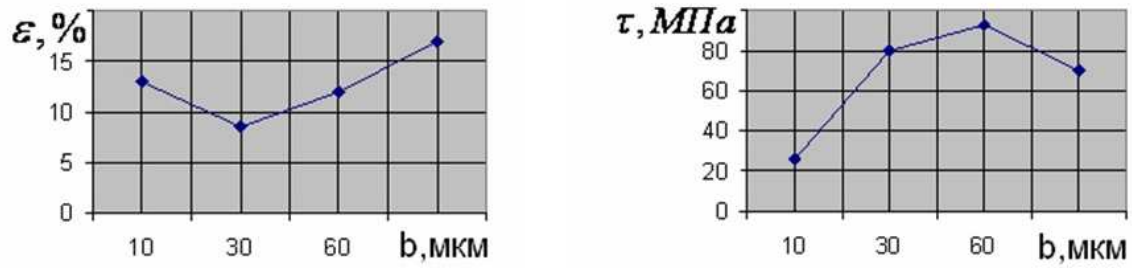
Подальше впровадження в промисловість паяння алюмінію та його сплавів зумовлюється передусім необхідністю вдосконалення технології цього процесу. Дослідженням процесів паяння алюмінію і його сплавів займаються практично в усіх провідних, економічно та технологічно розвинених країнах. Покращення працездатності, зменшення деформації матеріалу і забезпечення міцності потребує всебічного вивчення особливостей його з'єднання. Розроблення та підбір різноманітних припоїв, флюсів для забезпечення прецизійності та міцності з'єднання алюмінію та його сплавів мають актуальне значення [3].

Мета роботи – дослідження та розроблення технології отримання прецизійних з'єднань алюмінію та алюмінієвих сплавів із деформацією не вище 5 % та максимально можливою міцністю.

Викладення основного матеріалу. В роботі досліджується процес дифузійного паяння алюмінієвих сплавів, який здійснюється через металевий рідкий прошарок при відносно незначних зусиллях притискання з'єднуваних поверхонь.

Для наявності рідкої фази в зоні з'єднання у процесі паяння як прошарок застосовували мідь, яка утворює з алюмінієм хімічну сполуку за типом легкоплавкої евтектики. Подвійна евтектика Al – Cu крихка і потребує додаткових заходів усунення крихкості та активації дифузії рідкої фази в основний метал у процесі паяння для підвищення міцності з'єднання. Температура утворення евтектики 821 К [4], тому для отримання рідкої фази процес паяння здійснювали при температурі 833 К.

Паяння зразків здійснювали у вакуумі $10^{-2}…10^{-3}$ Па. Міцність паяних зразків визначали механічними випробуваннями до руйнування на зрізання із застосуванням розривної машини УМ-5.

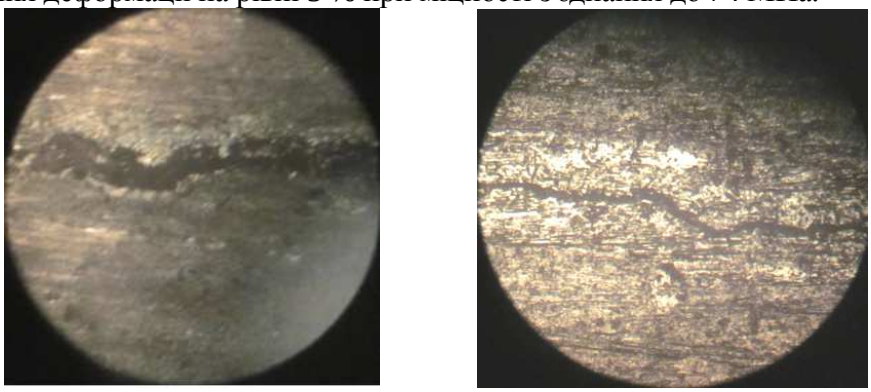


а *б*

Рис. 1. Залежність відносної деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від товщини проміжного мідного прошарку

На першому етапі досліджували вплив товщини мідного прошарку між з'єднуваними зразками на характеристики паяного з'єднання. Дифузійне паяння здійснювали на режимі: температура 833 К, зусилля стискання 2 МПа, час ізотермічної витримки 60 хв. Товщина проміжного прошарку міді становила 10, 30, 60 та 100 мкм. Шар товщиною 10 мкм отримували вакуумним напиленням, інші шари – за допомогою мідної фольги відповідної товщини. Результати досліджень свідчать (рис. 1) про помітну залежність як міцності, так і

деформації зразків від товщини застосованого мідного прошарку. У зразках із товщиною фольги 100 мкм утворюється забагато рідкої фази, яка частково витискується із зони з'єднання, що призводить до підвищення деформації. В той же час у зразках із мідним прошарком товщиною 10 мкм рідкої фази недостатньо для утворення міцного з'єднання. Найбільш ефективним є застосування проміжного мідного прошарку товщиною 30…60 мкм, коли найбільшій міцності 80…93 МПа відповідає помірна деформація зразка в межах 8…11 %. Зменшення зусилля стискання до 1,2 МПа при товщині прошарку 60 мкм привело до зниження деформації на рівні 5 % при міцності з'єднання до 74 МПа.

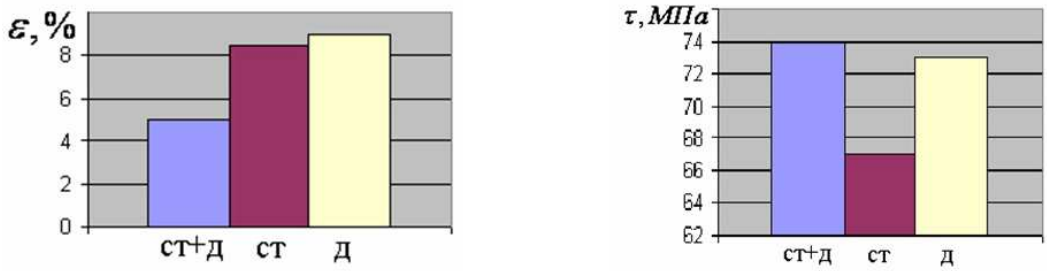


а *б*

Рис. 2. Мікрошліфи паяних з'єднань при товщині прошарку 30 мкм (а) та 100 мкм (б)

На мікрошліфах зразків із товщиною прошарку 60…100 мкм у зоні паяння спостерігаються диспергувані частинки основного металу (рис. 2), які не дифундують із розплаву і призводять до зниження міцності з'єднання. Для подрібнення диспергованих частинок у зоні спаю, а також інтерметалідів, що утворюються при кристалізації розплаву, застосовували прикладання до зразків у процесі паяння динамічного (вібраційного) навантаження. Досліджували три варіанти прикладених зусиль – статичне, динамічне та комбіноване (статичне та динамічне одночасно). Паяння здійснювали на режимі: температура 833 К, зусилля стискання 1,2 МПа, час паяння 60 хвилин. Динамічне навантаження забезпечували за допомогою електромагніта із частотою вібрації 100 Гц. Комбіноване навантаження в дослідах отримували при співвідношенні статичного та динамічного навантажень у межах від 1:1 до 1:3.

Результати випробувань паяних зразків свідчать, що динамічне навантаження сприяє підвищенню міцності з'єднань завдяки вирівнюванню хімічного складу шва та подрібненню інтерметалідів. Найбільш ефективним виявилось застосування комбінованого навантаження при співвідношенні статичного та динамічного зусиль як 1:2, при якому досягається максимальна міцність з'єднання із зниженням відносної деформації зразків до величини, меншої ніж 5 % (рис. 3).



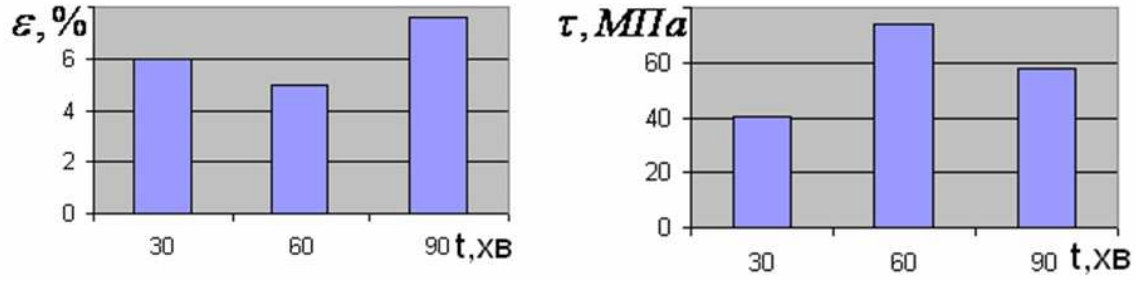
а *б*

Рис. 3. Залежність деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від виду прикладеного зусилля (статичного та динамічного)

В основу дифузійного паяння покладено явище дифузії рідкої фази, яка виконує функції припою, в основний метал. Процес дифузії є повільнодіючим, завдяки чому для здійс-

нення дифузійного паяння необхідний певний час ізотермічної витримки, який для різних металів може становити від 10 хвилин до 10 годин [5; 6]. У зв'язку з цим необхідно дослідити вплив часу ізотермічної витримки на міцність та прецизійність паяних з'єднань сплаву АМц. Паяні з'єднання отримували при температурі 833 К, прикладанні комбінованого зусилля загальною величиною 1,2 МПа при співвідношенні статичного та динамічного навантажень як 1:2. Час ізотермічної витримки змінювали в межах від 30 до 90 хвилин.

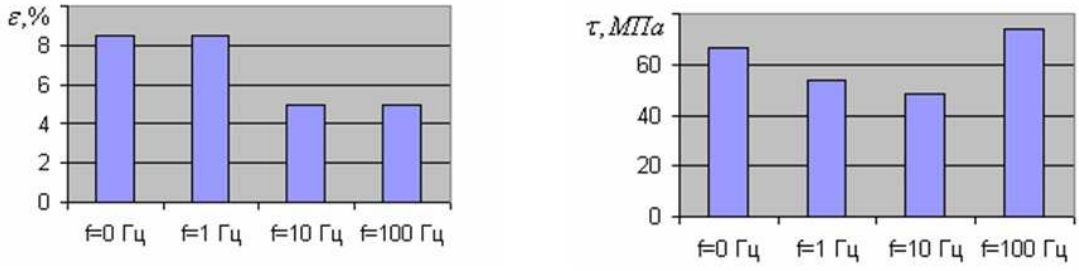
Результати випробувань зразків показують, що залежність їх міцності та деформації від часу паяння має екстремальний характер (рис. 4). Найкращі показники вказаних параметрів відповідають часу ізотермічної витримки 50…60 хвилин. При меншому часі витримки в паяній зоні спостерігаються скупчення диспергованих блоків алюмінію достатньо значних розмірів, що збільшують крихкість з'єднання. Зі збільшенням часу витримки до 60 хвилин ці блоки подрібнюються в рідкій фазі і рівномірно розподіляються по зоні з'єднання. При подальшому збільшенні часу паяння погіршуються властивості основного металу, викликані збільшенням зерна під дією високих температур, що призводить до зниження міцності з'єднання.



а *б*

Рис. 4. Залежність деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від тривалості ізотермічної витримки

На наступному етапі досліджували вплив частоти вібраційного навантаження на показники міцності та деформації паяних з'єднань. Режим паяння застосовували аналогічний попереднім дослідженням. Частоту вібрації динамічного навантаження забезпечували зміною частоти електричного струму в обмотці електромагніту в межах 1…10…100 Гц. Аналіз мікроструктур паяних з'єднань показує, що зі збільшенням частоти вібрації структура шва подрібнюється. При низьких частотах вібрації 1…10 Гц у зоні з'єднання присутні диперговані частинки основного металу, а також зерна інтерметалідної фази значних розмірів, що негативно впливає на міцність паяння (рис. 5). Зі збільшенням частоти вібрації до 100 Гц структура паяного шва стає дрібнозернистою і рівноважною, що дозволило отримати паяні з'єднання із міцністю на зрізання до 75 МПа при відносній деформації зразків менше 5 %.



а *б*

Рис. 5. Залежність деформації (а) та міцності (б) паяного з'єднання від частоти прикладеного вібраційного навантаження

Висновки. 1. Встановлено, що при дифузійному паянні прецизійність та міцність з'єднань алюмінію залежить від товщини проміжного металевого прошарку, який утво-

рює з основним матеріалом рідкий евтектичний шар, що виконує роль припою. Найкращі показники відносно міцності та прецизійності з'єднань отримані при товщині мідного прошарку 60 мкм. Товщина прошарку менше 30 мкм не забезпечує достатнього об'єму рідкої фази, що призводить до зниження міцності з'єднання. Збільшення товщини прошарку до 100 мкм супроводжується занадто перевищеним об'ємом рідкої фази і, відповідно, значною деформацією з'єднання.

2. Показано, що одночасне застосування в процесі дифузійного паяння статичного та динамічного навантаження позитивно впливає на якісні показники з'єднань, забезпечуючи активацію дифузії рідкої фази в основний матеріал, подрібнення інтерметалідної фази та підвищення міцності з'єднання. Найбільш високі показники з'єднань отримані при співвідношенні динамічного та статичного навантаження 2:1 та частоті вібрації 100 Гц.

3. Встановлено, що міцність та прецизійність паяних з'єднань сплаву АМц залежить від часу ізотермічної витримки у процесі паяння. Визначено, що при спільній дії статичного та динамічного навантаження максимальна міцність 73…75 МПа, що становить близько 50 % міцності основного матеріалу, при деформації зразків не вище 5 % досягається за час ізотермічної витримки 50…60 хв.

Список використаних джерел

1. *Алюминиевые* сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. Справочное руководство. – М. : Металлургия, 1972. – 552 с.

2. *Лашко С. В.* Пайка металлов / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1988. – 376 с.

3. *Петрунин И. Е.* Металловедение пайки / И. Е. Петрунин, И. Ю. Маркова, А. С. Екатова. – М. : Металлургия, 1976. – 264 с.

4. *Никитинский А. М.* Пайка алюминия и его сплавов / А. М. Никитинский. – М. : Машиностроение, 1983. – 192 с.

5. *Петрунин И. Е.* Пайка металлов / И. Е. Петрунин, С. Н. Лоцманов, Г. А. Николаев. – М. : Металлургия, 1973. – 279 с.

6. *Хряпин В. Е.* Справочник паяльщика / В. Е. Хряпин, А. В. Лакедемонский. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1974. – 328 с.

УДК 621.791:666.1.037.42

Л.Я. Березін, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ В ЗОВНІШІХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Л.Я. Березин, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ ВО ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

L.Y. Berezin, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

EQUIPMENT FOR THE WELDING PROCESS IN THE EXTERNAL ELECTRIC FIELDS OF HIGH VOLTAGE

Надані характеристики обладнання для зварювання в зовнішніх електричних полях високої напруги, яке спроектовано на кафедрі зварювального виробництва ЧДТУ.

Ключові слова: *зварювання в електричних полях, обладнання, конструктивні і технологічні особливості.*

Представлены характеристики оборудования для сварки во внешних электрических полях высокого напряжения, которое разработано на кафедре сварочного производства ЧГТУ.

Ключевые слова: *сварка в электрических полях, оборудование, конструктивные и технологические особенности.*

Presented characteristics of equipment for welding in the external electric fields of high voltage, which is developed at the Department of welding production ChSTU.

Key words: *welding in electric fields, equipment, constructional and technological features.*

Постановка проблеми. В авіо-, ракето-, суднобудуванні зараз широко використовуються прилади, до складу яких входять прецизійні вузли, що виготовляються з застосуванням зварювання в твердій фазі. В таких випадках достатньо широко використовується метод дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ). Але жорсткі технічні вимоги до таких вузлів, відносно висока температура зварювання, недостатня міцність зварних з'єднань не завжди дозволяє використовувати ДЗВ. До цього ще треба додати велику вартість зварювального обладнання і відносно низьку його надійність, що пов'язано з особливостями експлуатації вакуумних систем. Аналогічні вузли можна отримувати за допомогою використання зварювання в зовнішніх електричних полях (ЗЕП) високої напруги, яке теж проводиться в твердій фазі, але при цьому, в порівнянні з ДЗВ, якість зварних з'єднань для аналогічних вузлів до 50 % вище, обладнання значно простіше за конструкцією (зварювання проводиться в атмосфері повітря), більш надійніше і в декілька разів має меншу вартість [1]. На жаль, процес ЗЕП на теперішній час не має широкого промислового використання. Одна з причин цього – це відсутність необхідного зварювального обладнання. Друга причина, що стримує промислове використання ЗЕП – це не достатній обсяг досліджень, щоб з'ясувати повний механізм утворення зварного з'єднання, знання якого необхідні для визначення оптимальних технологічних параметрів зварювання.

Мета та завдання роботи. Метою роботи, що проводилася на кафедрі зварювального виробництва, було розроблення зварювального обладнання загального та спеціалізованого призначення, яке б дозволяло проведення дослідницьких робіт та для відтворення промислових технологічних процесів з використанням ЗЕП.

Виклад основного матеріалу роботи. Одним з перших завдань було розроблення обладнання загального призначення, яке б мало широкі технічні можливості для проведення досліджень на перспективу, а також дозволяло проводити зварювання реальних об'єктів.

На рисунку 1 показано загальний вигляд однієї з таких зварювальних установок. Технічні параметри установки за рисунком 1 наведені в таблиці 1. Установка дозволяє проводити процес ЗЕП в атмосфері повітря, захисних газів при нормальному і надлишковому тисках (0,5 МПа або 5 кгс/см2), а також у низькому вакуумі (1·10-6 МПа або 1·10-2 мм рт. ст). Установка дозволяє зварювати: скло, сигали, напівпровідники між собою та з металами. Максимальна температура, яку можна досягти в зварювальній камері, – 1223 К. У той же час, як показали дослідження з матеріалами переліку, що наведено, використання ЗЕП дозволяє проводити процес зварювання з отриманням якісних зварних з'єднань до 773 К.

Таблиця 1

Основні технічні дані установки за рисунком 1

Найменування параметра	**Величина параметра**
Габарити, *мм*	1330×840×1730
Об'єм зварювальної камери, $см^3$	$1 \cdot 10^4$
Максимально питомий тиск на деталі, що зварюються, *МПа (кгс/см²)*	50 (500)
Вакуум у камері, *МПа* (*мм рт. ст*)	$1 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-2}$)
Максимальний надлишковий тиск у камері, *МПа (кгс/см²)*	0,5 (5)
Вид нагріву	Радіаційний
Нагрівач	Ніхром
Потужність джерела нагріву, *кВт*	7
Робоче середовище	Повітря, захисні гази, вакуум
Максимальна температура нагріву, *К*	1223
Живлення установки від мережі	380 *В*, 50 *Гц*

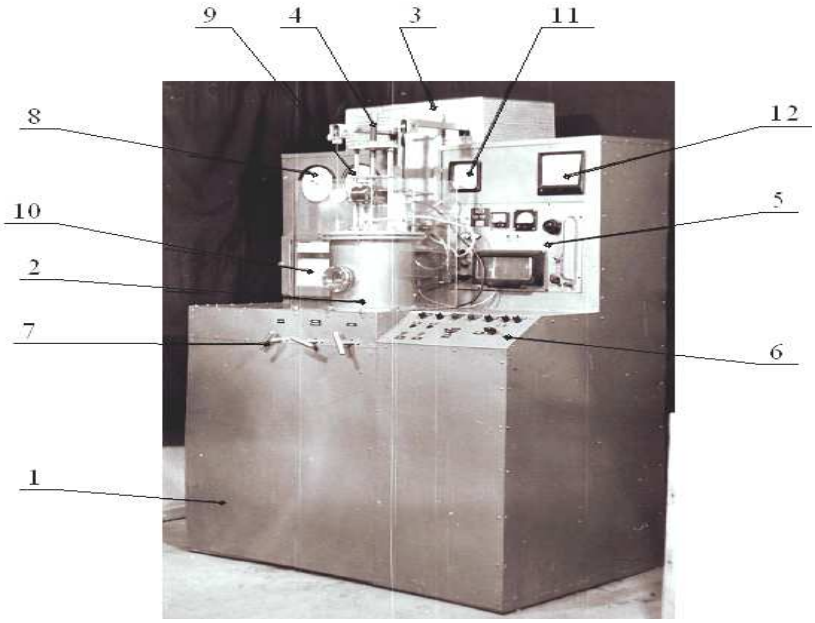


Рис. 1. Загальний вигляд установки для зварювання в електричному полі:
1 – корпус установки; 2 – зварювальна камера; 3 – механізм піднімання кришки зварювальної камери;
4 – механізм стискання деталей, що зварюються; 5 – високовольтне джерело живлення на базі УПУ-1М;
6 – пульт керування; 7 – вентилі відкачки і напуску газів у зварювальну камеру; 8 – вакуумметр;
9 – манометр для вимірювання надлишкового тиску в зварювальній камері; 10 – самописний потенціометр, що записує температуру в зоні зварювання; 11 – прилад М30ЗК для контролю величини температури зварювання; 12 – амперметр для контролю величини струму нагрівача

До складу установки (рис. 1) входять такі системи: вакуумна; нагріву деталей, що зварюються; стиснення деталей, що зварюються; зварювальна камера; механізм піднімання кришки зварювальної камери (всі системи, які необхідні для зварювання, змонтовані на кришці зварювальної камери); високовольтний блок живлення на базі УПУ-1М; блок керування з контрольно-вимірювальною апаратурою; охолодження зварювальної камери і високоамперних вводів. Більш повне уявлення про будову зварювальної камери дає рисунок 2. Джерело живлення системи нагріву забезпечує підвід струму до високоамперних вводів, які змонтовані в днищі зварювальної камери і забезпечують подачу струму до нагрівача у вигляді ніхромової спіралі.

Один з негативних процесів, що супроводжує СЕП, є розвиток електричних розрядів по поверхні деталей, що зварюються, та їх розвиток у площинах між електродами та деталями, що зварюються [2]. Є загальні відомості про вплив на зародження та розвиток цих зарядів величини тиску атмосфери. Установка, що наведена на рисунку 1, дозволяє дослідити зазначене явище при проведенні зварювання в атмосфері повітря і захисних газів, у низькому вакуумі до $1 \cdot 10^{-6}$ *МПа* (10^{-2} *мм рт. ст)* і надлишковому тиску атмосфери до 0,5 МПА (5 *атм*), а установка за рисунком 3 від до $1 \cdot 10^{-6}$ *МПа* (10^{-2} *мм рт. ст.*) до 10^{-11} *МПа* (10^{-7} *мм рт. ст*).

Зварювальне обладнання, що зображено на рисунку 3, сконструйовано і виготовлено на базі установки УВН-2М-2, за допомогою демонтажу оснастки для вакуумного напилення та проектування, виготовлення і встановлення технологічного оснащення, яке потрібно для проведення процесу ЗЕП та ДЗВ. Технічні параметри установки наведені в таблиці 2.

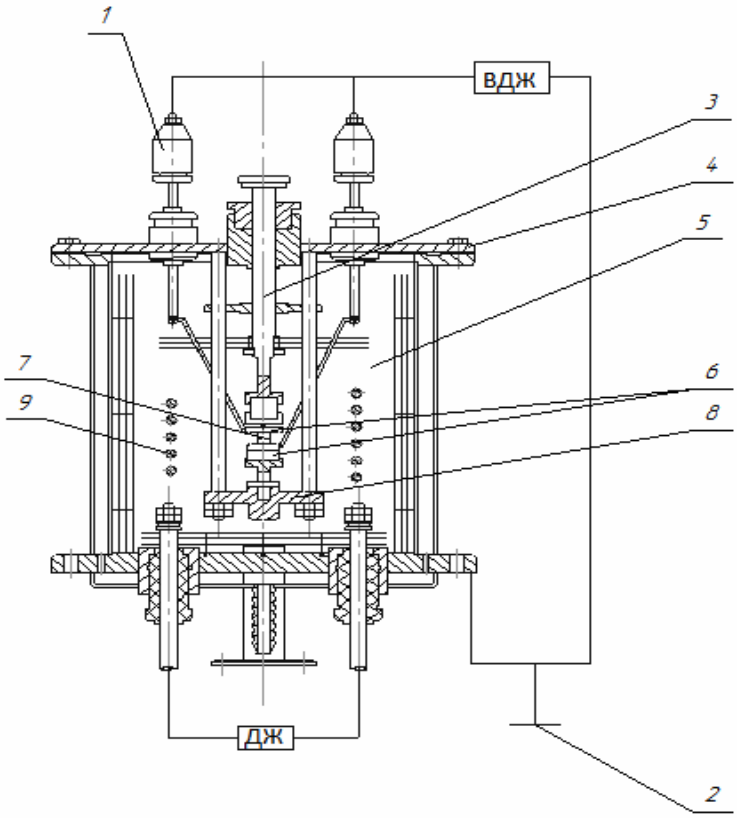


Рис. 2. Принципова схема зварювальної камери:
1 – високовольтні вводи; 2 – захисне заземлення; 3 – рухомий шток для передачі сили тиску на деталі, що зварюються; 4 – кришка зварювальної камери; 5 – зварювальна камера; 6 – електроди; 7 – виріб, що зварюється; 8 – траверса; 9 – нагрівач; ДЖ – джерело живлення системи нагріву; ВДЖ – високовольтне джерело живлення

Таблиця 2

Основні технічні дані установки за рисунком 3

Найменування параметра	**Величина параметра**
Габарити, *мм*	1420×1860×950
Об'єм зварювальної камери, $см^3$	$5 \cdot 10^4$
Максимальний тиск на деталі, що зварюються, *кН* (*кгс*)	1 (100)
Вакуум у камері без азотного уловлювача, *МПа* (*мм рт. ст*)	$1 \cdot 10^{-9}$ ($1 \cdot 10^{-5}$)
Вакуум у камері з азотним уловлювачем, *МПа* (*мм рт. ст*)	$1 \cdot 10^{-11}$ ($1 \cdot 10^{-7}$)
Вид нагріву	Радіаційний
Нагрівач при зварюванні у вакуумі	Молібден
Нагрівач при зварюванні на повітрі	Ніхром
Потужність джерела нагріву, *кВт*	3
Робоче середовище	Повітря, захисні гази, вакуум
Максимальна температура нагріву, *К*: у вакуумі на повітрі	 1973 873
Живлення установки від мережі	380 *В*, 50 *Гц*

До складу установки входять такі системи: вакуумний агрегат ВА-2-3РМ; паромаслювальний насос Н-2; механічний насос НВР-5Д; вакуумметр ВИТ-2, блок керування з контрольно-вимірювальною апаратурою; нагріву деталей, що зварюються, до складу якого входять трансформатор і нагрівач у керамічному корпусі; стиснення деталей, що зварюються, яка була сконструйована і розміщена безпосередньо під плитою вакуумної камери; зварювальна камера ковпакового типу; гідропривод піднімання ковпака; високовольтний блок живлення на базі УПУ-1М; охолодження ковпака та високоамперних вводів.

Для підводу струму до нагрівача передбачаються високоамперні вводи, а для подачі високовольтного потенціалу до зони зварювання – високовольтні вводи.

Однією з головних позитивних рис установки, що зображено на рисунку 3, це можливість проведення процесу ЗЕП в атмосфері повітря, захисних газів і вакууму, а також дифузійного зварювання у вакуумі. При зварюванні в електричному полі в атмосфері повітря процес зварювання проводиться при піднятому ковпаку. Схема механічного приводу системи стиску наведена на рисунку 4.

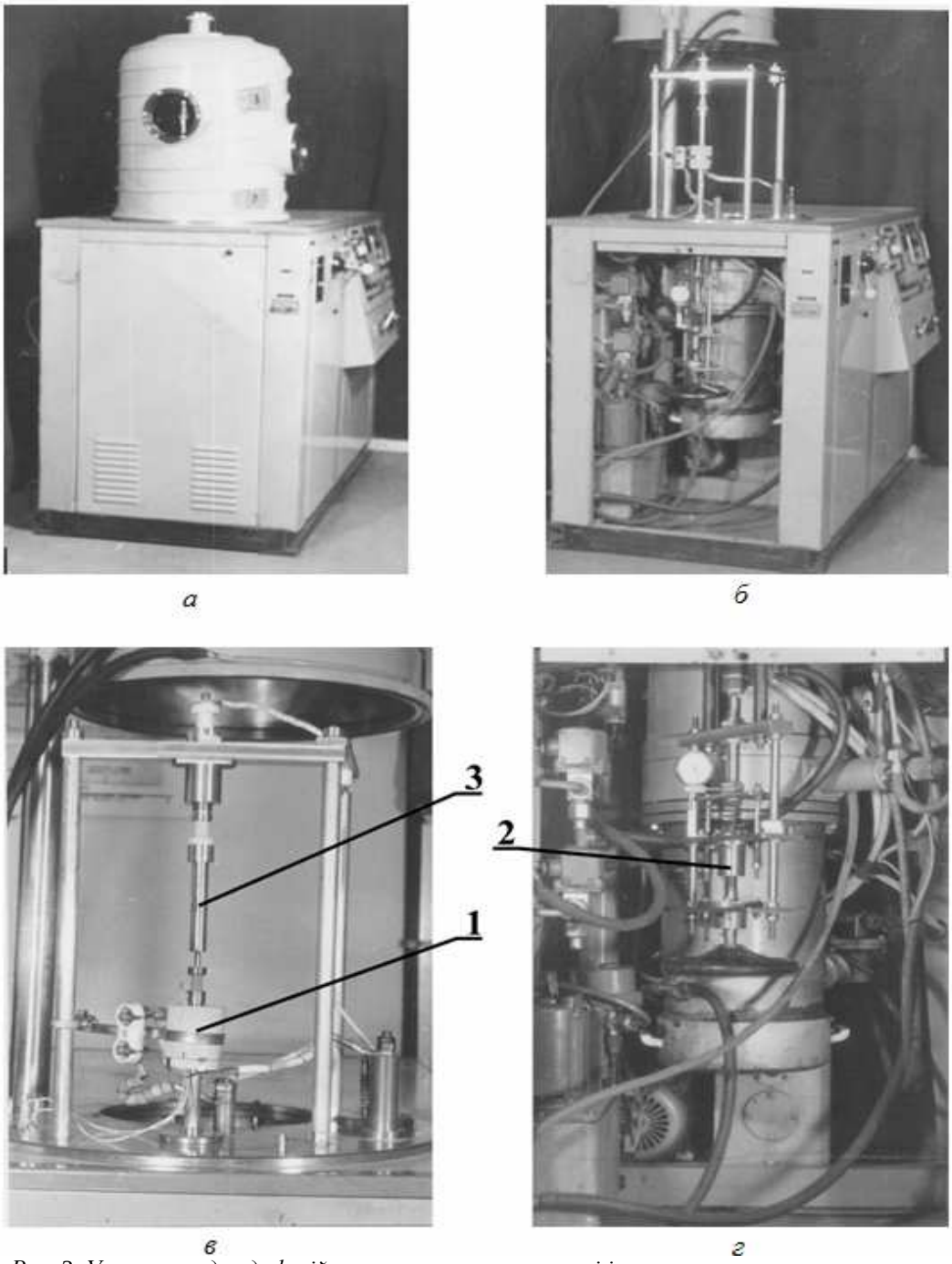


Рис. 3. Установка для дифузійного зварювання у вакуумі і зварювання в електричному полі: а, б – загальний вигляд; в – підковпаковий пристрій; г – система стиску; 1 – з`ємний нагрівач; 2 – механічний привод системи стискання; 3 – шток

Установки, що зображені на рисунку 1 і рисунку 3, виконані за варіантом підлогового типу.

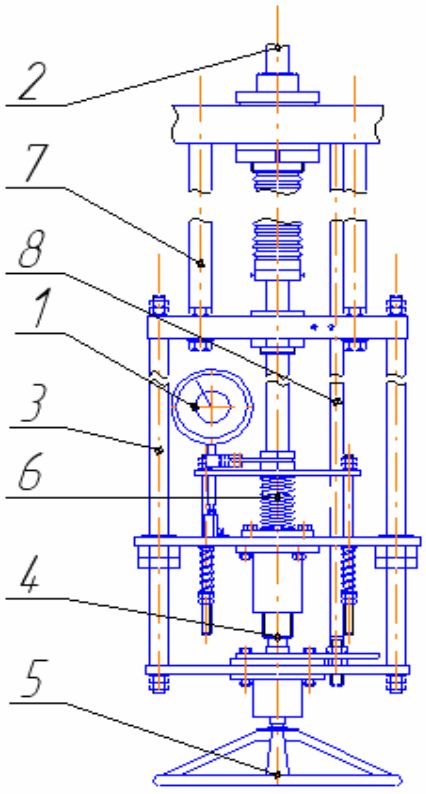


Рис. 4. Схема механічного приводу системи стискання вузлів, що зварюються:
1 – індикатор годинникового типу; 2 – силовий шток; 3 – направляюча; 4 – гвинт подачі силового штока;
5 – маховик подачі силового штока; 6 – пружина подачі силового штока; 7 – стояки; 8 – стояк жорсткості

Зварювальне обладнання, що зображено на рисунках 1-4, можна віднести до обладнання загального призначення, що дозволяє проводити широке коло дослідницьких робіт, а також проводити зварювання реальних об'єктів. Спеціалізоване зварювальне обладнання показано на рисунку 5.

Обладнання, що наведено на рисунку 5, використовується для виготовлення вузлів лазерного гіроскопа (рис. 6). Установка, що зображена на рисунку 5, *а*, призначена для зварювання вузлів катод – моноблок і аноди – моноблок, а на рисунку 5, *б* – для зварювання вузлів дзеркала – моноблок.

Основним елементом лазерного гіроскопа є кільцевий резонатор (кільцевий лазер), конструктивна схема якого зображена на рисунку 7.

Установка за рисунком 5, *а* комплектується автономним високовольтним джерелом живлення до 10 *кВ*. До складу установки входять (рис. 5, *а*): зварювальна камера *1*; система стискання вузлів, що зварюються *2*, до складу якої входить дилатометрична скоба *3*; блок контролю і регулювання температури зварювання *4*, механізм піднімання кришки зварювальної камери, високовольтний блок живлення *5* і пульт керування *6*. На рисунку 5, *в*: *1* – моноблок резонатора на етапі приварювання анодів; *2* – термопара; *3* – траверса, на яку встановлюється моноблок; *4* – стояки, на яких базується траверса.

До складу установки, що призначена для зварювання вузлів дзеркал (рис. 5, *б*), входить: пристосування *3*; нагрівач, що розташовується в кришці камери пристосування *4*, яке базується на плиті *2*, що охолоджується водою. Безпосередньо в корпусі установки *1* розташовані потенціометр КСП-1 для контролю і регулювання температури зварювання *5* і блок керування установкою *6*.

На рисунку 5, *г* і рисунку 8 показано загальний вигляд і схему механізму для центрування анодів – електродів установки, всередині яких знаходяться дзеркала, від-

носно отворів моноблоку гвинтами, що юстують, і гвинтовими притискачами з пружинами. На рисунку 5, *г*: *1* – пластина; *2* – пружина; *3* – катод резонатора, що попередньо приварюється до моноблоку; *4* – нижня частина камери; *5* – гвинти для юстування.

Технічні параметри установок (рис. 5) наведені в таблицях 3 і 4.

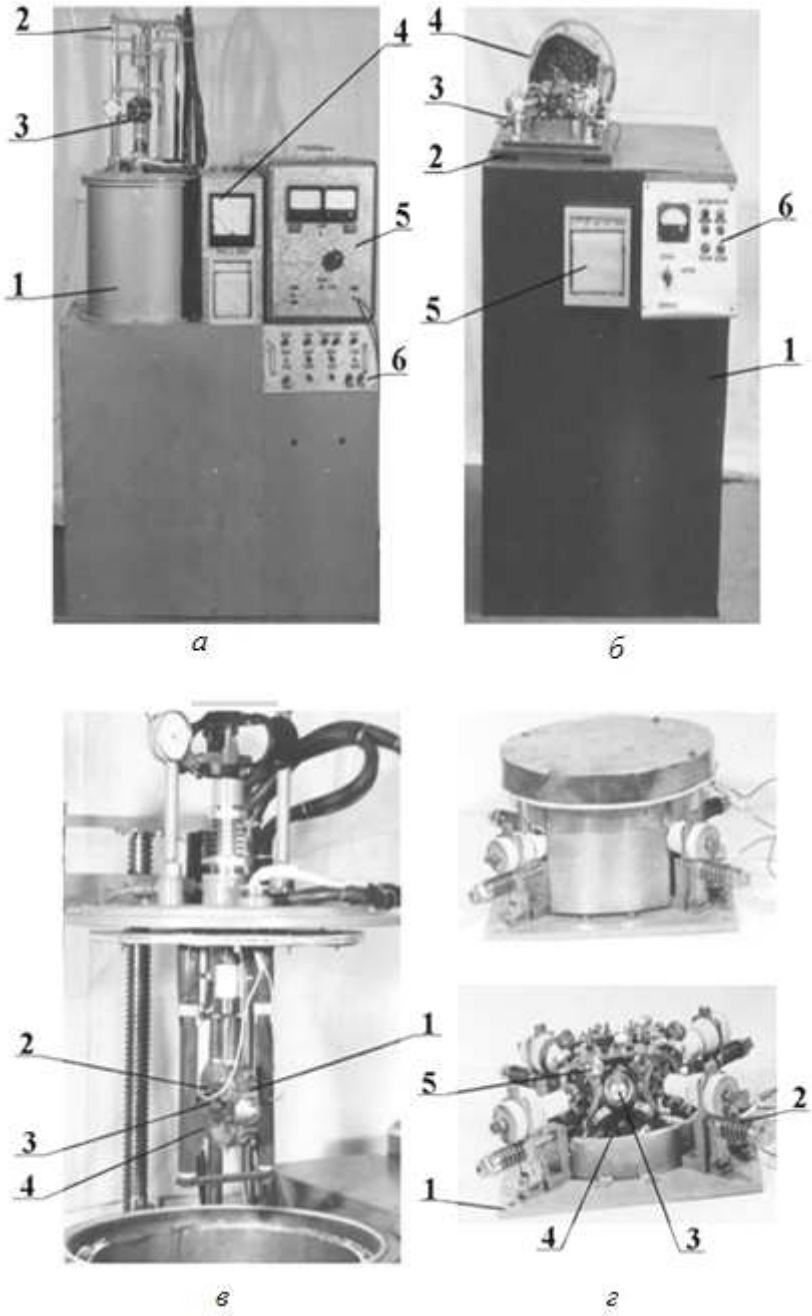


Рис. 5. Спеціалізоване обладнання для зварювання:
а, в – катодів та анодів; б, г – дзеркал (пояснення див. по тексту)

Рис. 6. Загальний вигляд лазерного гіроскопа

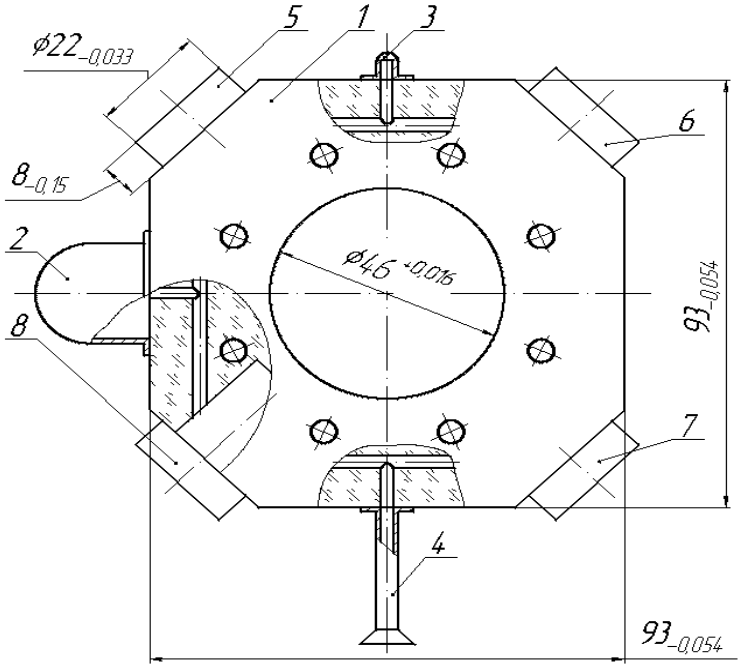


Рис. 7. Конструктивна схема резонатора: 1 – моноблок; 2 – катод; 3, 4 – аноди; 5-8 – дзеркала

Таблиця 3

Основні технічні дані установки за рисунком 5, а

Найменування параметра	**Величина параметра**
1	2
Габарити, *мм*	1110×1790×568
Об'єм зварювальної камери, $см^3$	$3,5 \cdot 10^4$
Максимальний тиск на деталі, що зварюються, *кН*, (*кгс)*: при комплектуванні динамометричною скобою ДС-02 при комплектуванні динамометричною скобою ДОСМ-3-3	 2 (200) 30 (3000)

Закінчення табл. 3

1	2
Високовольтне джерело живлення постійної напруги: Напруга, *кВ* Номінальний робочий струм, *mA* Час розрядки конденсаторів, *с* Потужність трансформатора, *Вт* Живлення джерела від мережі	 0 – 10 20 10 250 220 *В*, 50 *Гц*
Вид нагріву	Радіаційний
Нагрівач при зварюванні на повітрі	Ніхром
Потужність джерела нагріву, *кВт*	3
Робоче середовище	Повітря
Максимальна температура нагріву, *К*	873
Живлення установки від мережі	380 *В*, 50 *Гц*

Таблиця 4

Основні технічні дані установки за рисунком 5, б

Найменування параметра	**Величина параметра**
Габарити, *мм*	675×1220×585
Вид нагріву	Радіаційний
Нагрівач при зварюванні на повітрі	Ніхром
Номінальна потужність, що споживається, *кВт*	1
Робоче середовище	Повітря
Максимальна температура нагріву, *К*	573
Живлення установки від мережі	220 *В*, 50 *Гц*

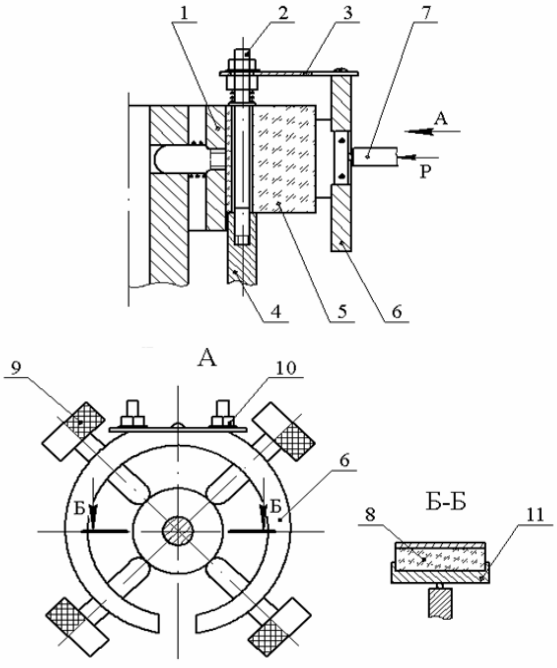


Рис. 8. Схема складання вузла дзеркала:
1 – пелюсток катода – електрода установки; 2 – штир; 3 – технологічні пластини; 4 – опора; 5 – моноблок; 6 – бандажне кільце; 7 – шток гвинтового притискача; 8 – дзеркало з напиленим шаром алюмінію; 9 – юстирувальний гвинт; 10 – гайка для закріплення технологічної пластини; 11 – анод – електрод установки

Зварювальне обладнання, що спроектовано на кафедрі зварювального виробництва, дозволяє проводити процес зварювання діелектриків, напівпровідників з металами та

між собою з забезпеченням заданої якості зварних швів [1; 3]. Зазначене обладнання пройшло лабораторне випробовування та показало свою працездатність і ефективність. Спеціалізоване обладнання було передано до виробництва. Міцність зварених вузлів до 50 % більша ніж при використанні ДЗВ і, що є дуже важливим, можуть отримуватися в атмосфері повітря. Техніко-економічне порівняння зварювального обладнання, яке використовується при СЕП і ДЗВ, показало, що спеціалізоване обладнання для ЗЕП має в декілька разів меншу вартість (не потрібні вакуумні системи), продуктивність (не потрібна герметизація зварювальної камери, температура зварювання на декілька сотень градусів менша (для вузлів катод – моноблок, аноди – моноблок 693-723 К; для вузлів дзеркала – моноблок 473 К) і в декілька разів менший оперативний час зварювання), меншу енергоємність, більшу надійність за рахунок відсутності вакуумних систем.

Висновки. На кафедрі зварювального виробництва ЧДТУ спроектовано і створено комплекс зварювального обладнання загального та спеціалізованого призначення для практичної реалізації процесу зварювання в зовнішніх електричних полях високої напруги. Обладнання, що спроектовано, дозволяє проводити процес зварювання діелектриків, напівпровідників з металами та між собою з забезпеченням заданої якості зварних швів. Спеціалізоване обладнання для зварювання в електричному полі в порівнянні з обладнанням для дифузійного зварювання у вакуумі має в декілька разів меншу вартість, більшу продуктивність, надійність, меншу енергоємність і дозволяє отримувати більш якісні зварні з’єднання.

Список використаних джерел

1. *Березин Л. Я.* Некоторые особенности процесса сварки в электростатическом поле диэлектриком с металлами и между собой / Л. Я. Березин // Автоматическая сварка. – 2001. – № 8 (581). – С. 45-48.

2. *Березин Л. Я.* Роль электроразрядных процессов при получении неразъемных соединений металлов с не металлами в электростатическом поле / Л. Я. Березин, Д. И. Котельников // Электронная обработка материалов. – 1991. – № 6. – С. 64-66.

3. *Березін Л. Я.* Напрямки використання зовнішніх електричних полів для отримання нероз’ємних з’єднань різнорідних матеріалів / Л. Я. Березін // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2011. – № 4 (53). – С. 94-103.

РОЗДІЛ V. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5:004.94

В.В. Казимир, д-р техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МНОГОАГЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В УСТАНОВКАХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

В.В. Казимир, д-р техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

БАГАТОАГЕНТНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ В УСТАНОВКАХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

V.V. Kazymyr, Doctor of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

MULTI-AGENT CONTROL OF THE ELECTRON BEAM IN THE ELECTRON BEAM WELDING MACHINES

Описывается метод управления электронным пучком в установках электронно-лучевой сварки, оборудованных несколькими электронными пушками, на основе использования многоагентного подхода. В качестве исходной информации, рассматриваются компьютерные модели профиля электронного пучка, полученные в результате предварительной диагностики. Управление параметрами пучка осуществляется по алгоритму, представленному в виде управляющей Е-сети, которая является моделью интеллектуального агента. В результате использования многоагентной системы достигается управление всеми электронными пушками установки по заданной программе, устойчивое к отклонениям в физических параметрах пучка.

Ключевые слова: *многоагентная система, модель профиля пучка, управляющая Е-сеть.*

Описується метод керування електронним пучком в установках електронно-променевого зварювання, обладнаних декількома електронними гарматами на основі використання багатоагентного підходу. Як вихідна інформація, розглядаються комп'ютерні моделі профілю електронного пучка, отримані в результаті попередньої діагностики. Управління параметрами пучка здійснюється за алгоритмом, який представляється у вигляді керуючої Е-мережі, що є моделлю інтелектуального агента. У результаті використання багатоагентної системи досягається управління всіма електронними гарматами установки за заданою програмою з урахуванням відхилень у фізичних параметрах пучка.

Ключові слова: *багатоагентна система, модель профілю пучка, керуюча Е-мережа.*

Here is described the method of control of the electron beam in the electron beam welding machines equipped by several electron guns through the use of multi-agent approach. As background information there are considered the computer models of electron beam profile obtained as the result of preliminary diagnostics. Control of the parameters of the beam is carried out according to the algorithm presented in the form of control E-net, which is a model of an intelligent agent. In the result of use of multi-agent system the control of all electronic guns are achieved according to a given program, taking into account variations in the physical parameters of the beam.

Key words: *multi-agent system, the model of the beam profile, the Control E-net.*

Постановка проблемы. Установки электронно-лучевой сварки (ЭЛС) являются яркими представителями класса промышленных роботов [1], на основе которых, при соответствующем уровне их разработки и применения, может быть сформирована интеллектуальная производственная система [2]. Повышенные требования к качеству управления установкой ЭЛС объясняются не только сложностью решаемых задач, но и особенностями самого процесса электронно-лучевой сварки. Электронная сварка, как правило, выполняется автоматически по заранее составленной программе и состоит в прохождении сфокусированного электронного луча большой мощности точно по линии стыка. При этом обязательным условием получения качественного сварного шва является стабильное поддержание заданных программой параметров токов пучка, фокусировки и бомбардировки.

В уникальных установках ЭЛС КЛ117, предназначенных для сваривания буровых долот, используются три электронно-лучевые пушки, которые должны производить сварку трех стыков одновременно. Пушки установлены стационарно и расположены по кругу на

удалении 120 градусов друг от друга, так что их лучи сориентированы на три стыка. Внешний вид установки КЛ117 и образцы долот показаны на рис. 1 и 2, соответственно.

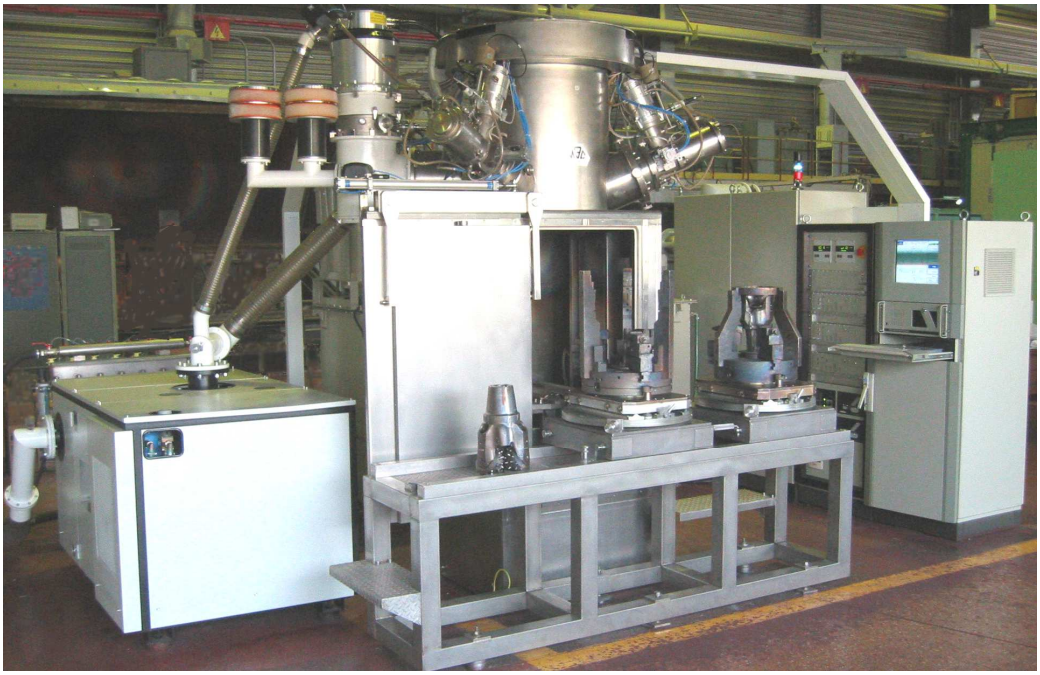


Рис. 1. Внешний вид установки ЭЛС КЛ117

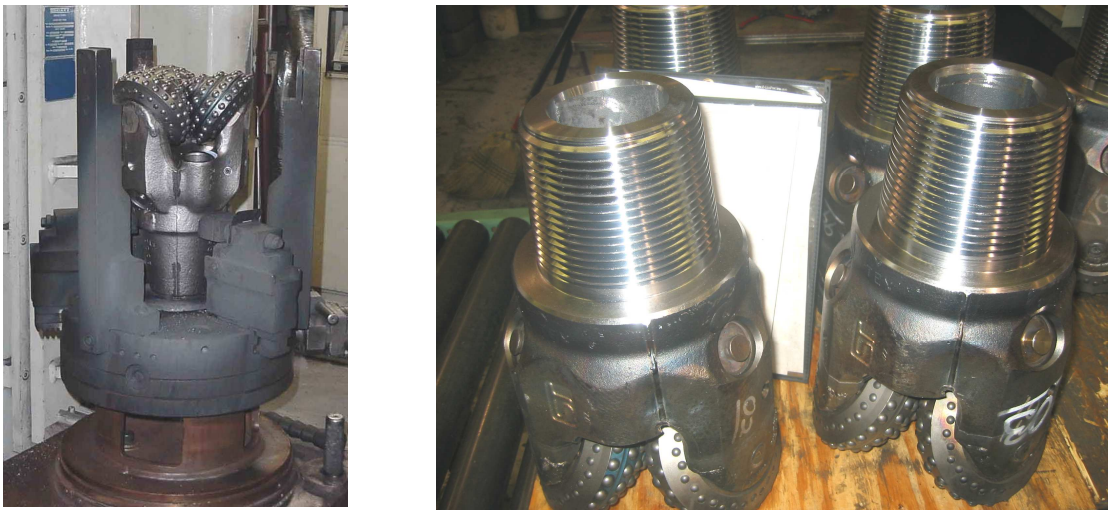


Рис. 2. Образцы свариваемых долот

Каждая электронная пушка управляется своим модулем компьютеризированной системы управления (КСУ), но программа сварки составляется общая и включает задание скорости перемещения изделия, тока пучка и тока фокусировки, значения которых определяются профилем изделия. Проблема, которая возникает в процессе сварки, состоит в том, что вследствие неконтролируемых отклонений в работе электрического оборудования и постепенного неравномерного износа катодов, наблюдается расхождение в физических параметрах электронных пушек. По этой причине заданное значение тока фокусировки отрабатывается каждой из пушек на своем уровне, и получаемые сварные швы отличаются по качеству, что является недопустимым. Задача состоит в том, чтобы, используя встроенные компьютерные модели физических процессов в пушках, обеспечить их согласованную работу по получению швов одинакового качества, несмотря на существующие отклонения в параметрах пушек.

В данной статье описывается метод программного управления, который обеспечивает за счет применения интеллектуальных агентов получение высококачественных сварных швов при одновременной работе трех электронных пушек в составе одной установки ЭЛС.

Суть многоагентного управления. Интеллектуальные агенты (ИА) позволяют реализовать задачи, связанные с горизонтальным взаимодействием элементов одного и того же уровня управления. Существует множество определений ИА [3], но все они, в основном, сводятся к свойствам автономности и целенаправленности. При этом характерными для ИА являются три основные функции [4]: 1) восприятие динамики среды; 2) действия, изменяющие среду; 3) рассуждения в целях интерпретации наблюдаемых явлений, решения задач и определения действий. Первые две возможности напрямую отвечают задачам, решаемым элементами управления, в частности связанным с «наделением ответственностью». Третья же функция значительно расширяет внутреннюю структуру элементов управления и создает предпосылки для их взаимодействия.

Взаимодействие агентов организуется в рамках многоагентных систем (МАС). Подробно вопросы теории МАС освещены во множестве работ, которые подробно проанализированы в [5]. Значительно меньше публикаций посвящено вопросу практической реализации МАС, особенно в области управления производством.

Среди множества известных архитектур агентов наиболее подходящей в плане обеспечения их взаимодействия является InterRap-архитектура [6], которая включает три уровня управления: реактивный, плановый и кооперативный. На реактивном и плановом уровнях управления агента логично использовать модели объектов управления, попадающие в его зону ответственности. На кооперативном уровне наличие модели локального объекта управления может стать недостаточным. Поэтому здесь агент формирует собственную модель управляемой системы путем информационного обмена между агентами. Это требует определенных действий и вычислений по определению состояний объектов управления системы, например, посылки запросов другим агентам по информационному каналу, получению ответов о состоянии объектов управления, определению наиболее актуальной информации и т. д. При выработке общего решения роль координатора может взять на себя один из агентов.

Построение моделей электронного пучка. Для получения исходной информации об объекте управления будем использовать модели профилей плотности тока пучка, получаемые с помощью системы диагностики, предложенной в [7]. Принцип работы данной системы основан на измерениях распределения мощности в пучке электронов при изменении тока фокусировки. Для этого используется специальный датчик, который пересекается пучком при различных значениях тока фокусировки. В результате строится распределение плотности тока в n поперечных сечениях луча. В пределах каждого k-го сечения плотность тока J_k принимается постоянной. Для нахождения неизвестных J_k строится система из n линейных алгебраических уравнений вида

$$S \cdot J = A, \qquad (1)$$

где S – матрица размерности $n \times n$ с элементами, пропорциональными площадям сечений;

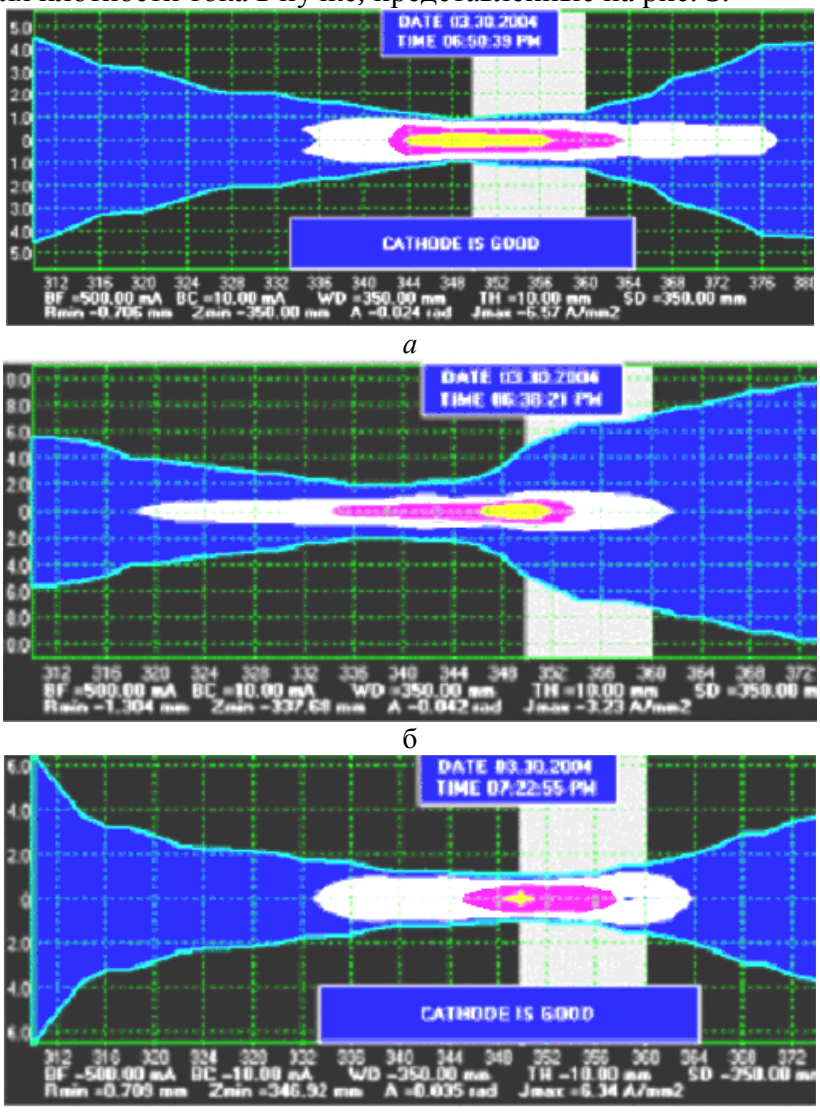
J – n-мерный вектор искомых значений плотности пучка;

A – n-мерный вектор амплитуд импульсов в каждом сечении.

По найденным значениям $J_k, k = \overline{1,n}$ строится распределение плотности тока для каждого поперечного сечения пучка. Сечение с наибольшей плотностью тока на оси $J_{\max}$ соответствует острой фокусировке пучка. Для каждого распределения рассчитывается значе-

ние эффективного радиуса луча R в предположении, что распределение плотности тока можно аппроксимировать нормальным законом. В пределах этого радиуса проходит 63 % всего тока луча. Таким образом, острой фокусировке с наибольшей плотностью тока будет соответствовать наименьший эффективный радиус пучка $R_{\min}$.

Для трех различных пушек в составе одной установки ЭЛС могут быть получены модели профиля плотности тока в пучке, представленные на рис. 3.



а

б

в

Рис. 3. Модели восстановления профилей плотности тока в пучке:
а – пушка 1; б – пушка 2; в – пушка 3

Распределение плотности тока по сечениям пучка вдоль его оси отображается четырьмя областями: 10-25 %, 25-50 %, 50-75 % и 75-100 % максимальной плотности. Данные диаграммы являются компьютерными моделями физических процессов в пушках.

Алгоритм многоагентного управления. Схема, поясняющая расчеты, используемые при работе предлагаемого алгоритма управления, приведена на рис. 4.

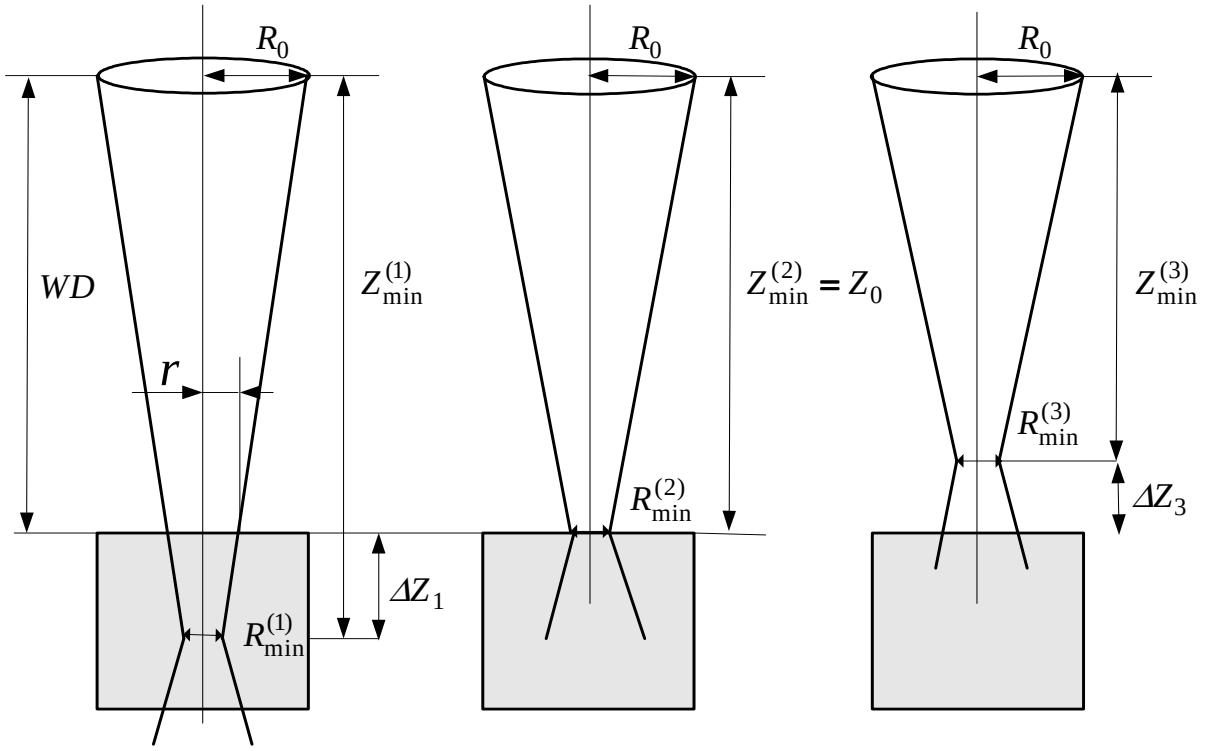


Рис. 4. Схема расчетов алгоритма многоагентного управления

На рис. 4 обозначены:

– R_0 – радиус луча в плоскости фокусирующей линзы;

– $R_{\min}^{(i)}$ – наименьший эффективный радиус i-й пушки;

– $Z_{\min}^{(i)}$ – расстояние до зоны максимальной плотности пучка i-й пушки;

– WD – расстояние до поверхности изделия (рабочее расстояние);

– $\Delta Z^{(i)}$ – удаление зоны максимальной плотности пучка i-й пушки от поверхности изделия;

– r –радиус пучка на поверхности изделия.

При рассогласовании $Z_{\min}^{(i)}$ необходимо привести их к общему показателю, чтобы обеспечить работу всех пушек при выполнении программы сварки, например, на остром фокусе. Для этого рассчитаем поправки для программного значения тока фокусировки I_f по формуле

$$\Delta I_f^{(i)} = \Delta Z^{(i)} \cdot K_1^{(i)} \cdot K_2^{(i)}, \qquad (2)$$

где $\Delta Z^{(i)} = Z_{\min}^{(i)} - Z_0$;

$K_1^{(i)}$ – коэффициент, учитывающий изменение фокусного расстояния при изменении $Z_{\min}^{(i)}$;

$K_2^{(i)}$ – коэффициент, учитывающий изменение фокусного расстояния при изменении тока фокусировки.

При существующих малых значениях углов сходимости лучей коэффициент $K_1^{(i)}$ определяется по формуле

$$K_1^{(i)} = \frac{R_0 - R_{\min}^{(i)}}{R_{\min}^{(i)}}. \quad (3)$$

Коэффициент $K_2^{(i)}$ для каждой конкретной пушки оценивается по специальной методике при установке нового катода и используется в расчетах в качестве исходного параметра. Важно отметить, что при увеличении тока фокусировки значение $Z_{\min}^{(i)}$ уменьшается, т. е. всегда $K_1^{(i)} < 0$.

При реализации описанного выше механизма согласования токов фокусировки трех пушек будем использовать систему многоагентного управления, включающую три модуля, работающие на принципах интеллектуальных агентов. Каждый агент будем описывать с помощью модели, представленной в виде управляющей E-сети. Пример такой модели агента приведен на рис. 5.

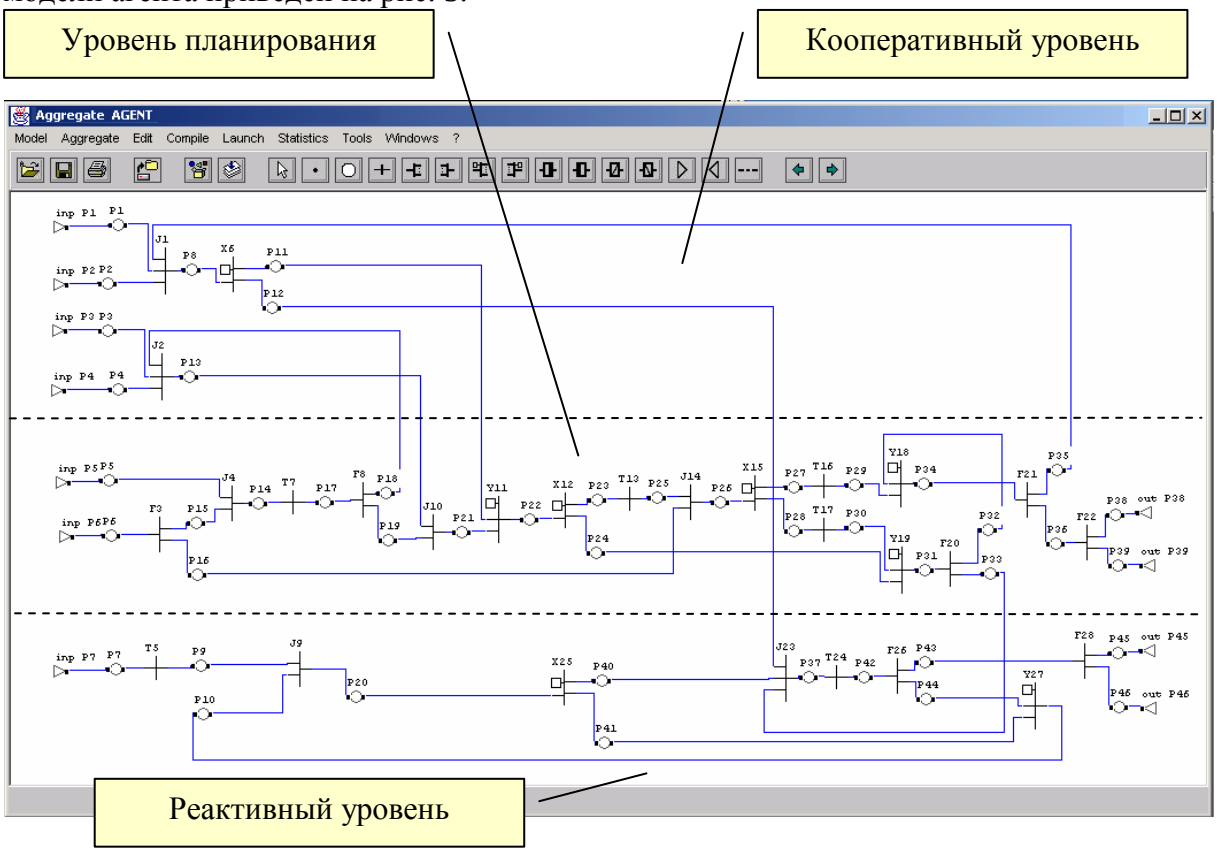


Рис. 5. Модель агента

Управляющие E-сети (CEN – control E-net) [8] являются расширением сетей Петри, ориентированные на задачи управления. Как и во всех разновидностях сетей, Петри структура CEN эквивалентна ориентированному двудольному графу, в котором одно множество вершин есть P (позиции), другое T (переходы). Однако позиции E-сети могут содержать метки с множеством атрибутов $M = (M(p_1), M(p_2), ..., M(p_n))$. Переходы могут быть различных пяти типов $\{"T_T", "T_F", "T_j", "T_X", "T_Y"\}$, которые отличаются правилами перемещения меток из входных позиций перехода в выходные.

От обыкновенных E-сетей [9] управляющие E-сети отличаются введением дополнительных переходов-очередей "T_{QL}" и "T_{QF}", дополнительным использованием множества переменных сети (входных и выходных сигналов), представленных как в аналоговой, так и цифровой форме, а также множества управляющих отображений, которые определяют правила срабатывания переходов сети, в том числе и с учетом состояния объекта управления. CEN является моделью алгоритма управления: при срабатывании переходов изменяется маркировка переходов, определяющая состояние алгоритма.

Модель агента, представленная на рис. 5, задает три уровня управления током фокусировки пушки:

На кооперативном уровне решаются задачи обмена информацией между агентами, управляющими пушками, с целью определения согласованного уровня фокусного расстояния. Исходные данные поступают в виде меток от смежных агентов через входные граничные позиции *P1-P4*. В частности, позиции *P1* и *P2* получают метки, содержащие два атрибута (N, NA), где N означает номер агента (пушки), а NA – принятое данным агентом решение о номере ведущей пушки, к уровню фокуса которой должны приводиться остальные агенты. Позиции *P3* и *P4* получают метки, содержащие набор атрибутов (N, DF), где DF означает вычисленное агентом N требуемое для него изменение тока фокусировки. Указанные знания кооперативного уровня сравниваются на переходах *J1* и *J2*, после чего согласованные результаты передаются на плановый уровень агента. При этом возможны два варианта согласования:

– всеми агентами принимается решение о назначении ведущей пушки со средним уровнем $Z_{WD} = Z^k_{\min}, (Z^i_{\min} \le Z^k_{\min} \le Z^j_{\min}), k, j \in \{1,2,3\}$;

– ведущей принимается пушка, для которой не выполняются установленные ограничения для значений токов фокусировки $Z_{WD} = Z^k_{\min}, (Z^k_{\min} < Z^j_{\min}) \vee (Z^k_{\min} > Z^j_{\min}), k \ne j; k, j \in \{1,2,3\}$.

На уровне планирования на основе информации о результатах диагностики по данной пушке (метка во входной позиции $P5 = (Z_{\min}, R_{\min})$) и граничных значениях тока фокусировки, определяемых программой сварки (метка во входной позиции $P6 = (I_{f\min}, I_{f\max}, WD)$), производится:

– проверка возможности отработки указанного интервала токов при существующем фокусе (переход *T7*) на удовлетворение существующих ограничений для токов фокусировки $I^0_{f\min} \le (I_f + \Delta I_f) \le I^0_{f\max}$;

– вычисление по формуле (2) на основе согласованного уровня $Z_{\min}$ требуемого изменения тока ΔI_f (переход *T16*), которое на переходе *X18* снова проверяется на заданные ограничения;

– выдача данных о результатах расчетов в другие агенты (через позиции *P38* и *P39* передаются признаки принятия/непринятия согласованного решения данным агентом, а через позиции *P45* и *P46* – рассчитанное значение ΔI_f).

На реактивном уровне заданное программой значение тока фокусировки I_f (поступает в позицию *P7*) с помощью функции преобразования перехода *Y27* корректируется в соответствии с выработанной поправкой ($I_f = I_f + \Delta I_f$) и через выходной сигнал передается для исполнения в модель управления источником питания пушки. От-

работка программных значений тока фокусировки производится в цикле по мере их поступления от модуля управления движением.

Представленная графическая модель агента, полученная с помощью системы имитационного моделирования JESS [10], после обработки препроцессором встраивается в контур управления ЭЛС в виде файла в формате XML, который исполняется специальным интерпретатором сети. Для каждой электронной пушки используется свой модуль управления с аналогичной моделью агента.

Выводы. Описанный выше метод управления несколькими электронными пушками в составе одной установки ЭЛС позволяет реализовать многоагентное управление электронным пучком каждой из пушек по одной заданной программе сварки с учетом отклонений в физических параметрах пушек. Это обеспечивает получение однотипных сварных швов в процессе сварки одного изделия несколькими пушками одновременно. В результате существенно сокращается время процесса сварки и достигается ее высокое качество.

Список использованных источников

1. *Патон Б. Е.* Промышленные роботы для сварки / Б. Е. Патон, Г. А. Спыну, В. Г. Тимошенко. – К. : Наукова думка, 1977. – 228 с.

2. *Литвинов В. В.* Модельно-ориентированное управление как стратегия функционирования интеллектуальных производственных систем / В. В. Литвинов, В. В. Казимир // Математические машины и системы. – 2004. – №. 4. – С. 143-156.

3. *Тарасов В. Б.* Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте / В. Б. Тарасов // Новости искусственного интеллекта. – М. : Ассоциация искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 5-63.

4. *Wooldridge M.,* Jeennings N. Intelligent Agents : Theory and Practice // The Knowledge Engineering Review. – 1995. – Vol. 10, № 2. – P. 115-152.

5. *Городецкий В. И.* Многоагентные системы (обзор) / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов // Новости искусственного интеллекта. – М. : Ассоциация искусственного интеллекта, 1998. – № 2. – С. 64-116.

6. *Muller J. P.,* Pishel M., Thiel M. Modelling Reactive Behaviour in Vertically Layered Agent Architecture // Intellegent Agents. Proc. of ECAI–94. – Berlin : Springer Verlag, 1994. – P. 261-276.

7. *Система* диагностики электронного луча в установках для электронно-лучевой сварки / К. С. Акопьянц, О. К. Назаренко, В. В. Гумовский, В. П. Чернякин // Автоматическая сварка. – 2002. – № 10. – С. 30-33.

8. *Казимир В. В.* Моделирование синтетического окружения для реактивных систем / В. В. Казимир // Математичне моделювання. – 2003. – № 2 (10). – С. 24-32.

9. *Nutt G.J.* Evaluation Nets for Computer Systems Performance Analysis. FJCC, AFIPS PRESS. – 1972. – Vol. 41. – P. 279-286.

10. *Kazymyr V.,* Demshevska N. Application of Java-Technologies for Simulation in the Web // Lecture Notes in Informatics (LNI) Proceedings. Series of the German Informatics Society (GI) : Bohn. – 2001. – Vol. P-2. – P. 173-184.

УДК 004.031.6

В.В. Литвинов, д-р техн. наук
И.В. Богдан, ассистент
К.С. Сливко, магистрант
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В.В. Литвинов, д-р техн. наук
І.В. Богдан, асистент
К.С. Слівко, магістрант
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ВЕРИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

V.V. Lytvynov, Doctor of Technical Sciences
I.V. Bohdan, assistant
K.S. Slivko, undergraduate
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

SOFTWARE MODELS OF TOOLS VERIFICATION

Обоснована необходимость проверки правильности диаграмм на этапе проектирования программного обеспечения. Рассмотрены наиболее известные средства, позволяющие проводить верификацию UML-диаграмм. Проведена сравнительная оценка существующих средств. Основными критериями оценки являются открытость кода, точность проверки, количество задействованных методов верификации.

***Ключевые слова**: верификация, диаграмма, UML, открытое программное обеспечение.*

Обґрунтовано необхідність перевірки правильності діаграм на етапі проектування програмного забезпечення. Розглянуто найбільш відомі засоби, що дозволяють проводити верифікацію UML-діаграм. Проведене порівняльне оцінювання існуючих засобів. Основними критеріями оцінювання є відкритість коду, точність перевірки, кількість задіяних методів верифікації.

***Ключові слова**: верифікація, діаграма, UML, відкрите програмне забезпечення.*

The necessity of checking of the correctness of the diagrams in the design phase of the software development was justified. The most well-known instruments to allow verification of UML-diagrams were considered. A comparative evaluation of existing funds was conducted. The main criterias are the openness of the code, the accuracy of testing, the number of involved methods of verification.

***Key words**: verification, chart, UML, open source software.*

Постановка проблемы. На данный момент существует достаточно много инструментальных средств, позволяющих выполнять как различные виды тестирования, так и несколько видов тестирования программного обеспечения в комплексе.

Однако существует небольшое количество инструментальных средств, которые выполняют верификацию программного обеспечения и, в частности, верификацию моделей программного обеспечения, где под моделью чаще всего подразумевается множество UML-диаграмм (диаграмма вариантов использования, диаграмма классов, диаграмма последовательности, диаграмма состояний и другие диаграммы из базового набора и не только).

Анализ последних исследований и публикаций. Верификация моделей является относительно новой сферой исследований, поэтому соответствующих публикаций существует крайне мало. Наиболее известной книгой по данной тематике является «Тестирование объектно-ориентированного программного обеспечения» Дж. Макгрегора. В ней он предлагает основные методы верификации.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Средство верификации программного обеспечения должно позволять:

– максимально точно оценить правильность модели;

– сводить к минимуму количество ошибок на этапе разработки.

Цель статьи. Главной целью данной работы является обзор существующих инструментальных средств верификации моделей программного обеспечения, выделение осно-

вных положительных и отрицательных качеств каждого средства, а также введение нового средства, позволяющего обеспечивать максимально корректную верификацию.

Изложение основного материала. Среди существующих инструментальных средств верификации моделей программного обеспечения можно выделить такие:

ArgoUML

ArgoUML – приложение для создания UML-диаграмм, написанное на языке Java и выпущенное под лицензией открытого программного обеспечения – EclipsePublicLicense (EPL) [1]. Так как это Java-приложение, оно доступно на любой платформе, поддерживающей Java.

ArgoUML пока не полностью реализовал стандарты UML.

Функциональность ArgoUML включает в себя:

1. Все 9 базовых диаграмм UML 1.4 поддерживаются, хотя еще не реализованы. Только диаграмма классов и диаграмма вариантов использования представлены в более или менее полном объеме.
2. Платформо-независимость (начиная с Java 1.5).
3. Нет необходимости в установке, можно работать через браузер.
4. Поддержка стандарта UML 1.4.
5. Поддержка XMI.
6. Возможность экспорта диаграмм в GIF, PNG, PS, EPS, SVG и PGML.
7. Возможность работы на десяти языках: EN, EN-GB, DE, ES, IT, RU, FR, PT, NB, ZH.
8. Интерфейс является интуитивно понятным и удобным для использования.
9. Автоматическая верификация UML-модели.
10. Поддержка OCL.
11. Генерация исходного кода Java, C++, C# и PHP.
12. Обратный инжиниринг из исходного кода и байткода Java.

К недостаткам данного приложения можно отнести нереализованность части функционала, а также отсутствие поддержки UML 2.

TelelogicTAUG2

TAUG2 от Telelogic – это средство моделирования, которое сочетает в себе мощь и простоту использования, а также предоставляет возможность начальной верификации и симуляции создаваемых моделей. Однако данный продукт не является широко распространенным и популярным. Одной из основных причин этому является его проприетарность.

TAU позволяет создавать все виды диаграмм UML 2.0, проверять их корректность и синтаксическую правильность, симулировать выполнение диаграмм, экспортировать и печатать диаграммы и многое другое. Работает на таких платформах, как:

– Windows 2000 Professional,
– Windows XP,
– SunSolaris,
– Redhat Enterprise Linux,
– Citrix XPe.

Поддерживаются такие компиляторы: Microsoft Visual Studio. NET, Wind River Systems C/C++, gnu gcc, Sun Studio 8 C/C++, Java SDK**, Green Hills MULTI C, C++.

TAU интегрируется в такие распространенные среды программирования, как Microsoft Visual Studio. NET и Eclipse.

Что касается редакций пакета, то (не считая специализированных версий) их три:

1. TAU/ModelAuthor.

Это продвинутая среда моделирования UML 2.0, включающая проверку синтаксиса и семантики, что позволяет планировщикам и архитекторам создавать точные, простые для понимания и логичные спецификации.

2. TAU/Architect.

Добавлена поддержка SysML, динамической симуляции выполнения моделей и их верификации.

3. TAU/Developer.

Добавлена возможность генерации кода для C, C++ или Java, что позволит разработчикам работать более эффективно. Telelogic поддерживает UML 2.0, что уже дает ему преимущество над ArgoUML.

К недостаткам Telelogic можно отнести отсутствие каких-либо демо- или пробных версий с ограниченной функциональностью. Так как данное ПО проприетарное, что ограничивает возможность его использования и распространения.

Visual Paradigm

Visual Paradigm for UML – это профессиональный инструмент для работы с UML, который поддерживает весь рабочий цикл программы – анализ, ориентированный на объекты, ориентированный на объекты дизайн, конструкцию, тестирование и разработку [2].

С помощью программы UML моделирования можно создавать все типы классовых диаграмм, просматривать в обратном порядке код, генерировать код с диаграмм и генерировать документацию.

Важным преимуществом является сервисная программа UMLCASE, которая предоставляет удобные UML-руководства, интерактивные UML-демонстрации и UML-проекты.

Работает на таких платформах, как:

– Window,

– Linux,

– Mac OS X.

Поддерживает проверку правильности диаграмм.

Недостатком является коммерческое использование, а также необходимость дополнительно скачивать документацию.

Enterprise Architect

Одним из наиболее популярных средств для создания UML-диаграмм является Enterprise Architect.

Данную среду разработки также можно использовать для верификации UML-диаграмм по правилам UML. В Enterprise Architect верификация диаграммы включена в понятие «валидация». Правила же UML можно указать в специальном диалоговом окне Model Validation Configuration, также как и любые ограничения, при использовании языка Object Constraint (OCL). Можно обеспечить проверку одного элемента UML, диаграммы или всего пакета.

Валидация в пакете UML может осуществляться на нескольких уровнях:

– Уровень элементов. Происходит проверка элемента и его потомков характеристик (атрибуты и операции) и отношений (связи).

– Уровень диаграмм. Проверяется сама диаграмма (ее корректность), а также любые элементы и связи в диаграмме.

– Уровень пакетов. Проверяется пакет и все подпакеты, элементы, связи и диаграммы в нем.

Enterprise Architect выполняет проверку и отображает результаты в окне вывода. Он имеет удобный графический интерфейс для визуализации процесса валидации, который можно остановить в любой момент.

На рисунке 1 показан пример ошибки, которую может отследить Enterprise Architect. Класс не может наследовать сам себя.

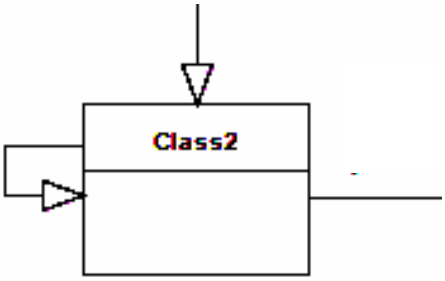


Рис. 1. Пример некорректной связи на диаграмме

Однако Enterprise Architect является проприетарным программным обеспечением, соответственно, доступен не всем, не позволяет проследить алгоритм работы и увидеть исходный код. Также существует мало документации по верификации для данного пакета, что также может вызвать некоторые затруднения при работе.

UMLTester

UMLTester – это инструментальное средство верификации, которое позволяет оценивать корректность UML-диаграмм. Оно обеспечивает верификацию диаграмм классов и диаграмм последовательности. Однако в перспективе, помимо указанных, оно будет обеспечивать проверку всех базовых диаграмм UML: диаграммы вариантов использования, диаграмма состояний и т. д.

Так как это Java-приложение, оно работает на любой платформе, которая поддерживает Java (начиная с Java 1.5). Диаграммы классов и последовательности должны поступать на вход в комплексе, поскольку верификация диаграммы последовательности выполняется при использовании результатов тестирования классов.

Так как для приложения необходима утилита, которая бы являлась открытой и имела возможность создания максимального количества существующих UML-диаграмм, используется утилита uml2 modelingtools, которая является бесплатной, обеспечивает создание базовых диаграмм, а также интегрируется с открытой средой разработки Eclipse.

Ниже представлена архитектура данного средства (рис. 2).

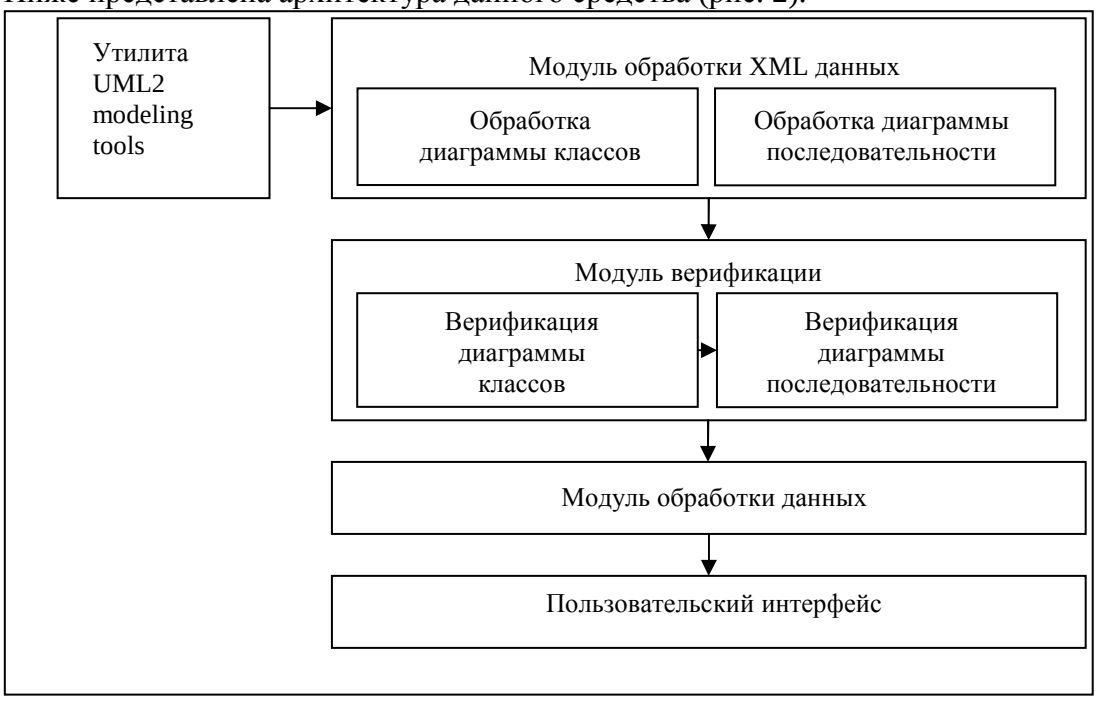


Рис. 2. Архитектура инструментального средства «UML Tester»

Ниже представлено описание модулей инструментального средства «UML Tester”:

Модуль обработки XML данных

При создании диаграммы с помощью выбранной утилиты, появляются два файла: непосредственно сама диаграмма, а также файл *.uml, в котором диаграмма представляется в виде XML-файла. Именно этот файл используется далее для парсинга диаграммы, поскольку формат XML является одним из простейших и существенно упрощает работу разработчика.

После получения нужных диаграмм в формате XML, данные XML обрабатываются и представляются в виде java объектов. Получение этих объектов происходит при помощи парсеров с использованием библиотеки dom4j, которая позволяет парсить DOM-дерево для Java.

Парсер диаграммы классов позволяет получить названия классов, их идентификаторы, названия методов и атрибутов. Что касается парсера диаграммы последовательности, он позволяет получить линии жизни, сообщения, их идентификаторы, фрагменты, показывающие процесс передачи сообщений и их последовательность.

Модуль верификации

Идея, используемая в предлагаемом средстве верификации, состоит в том, что существующие и предложенные разработчиками инструментальные средства верификации диаграмм используются в комплексе.

В настоящее время существуют такие основные подходы к определению корректности диаграмм классов [3]:

– *метод линейных неравенств.* Метод используется для диаграммы классов, которая включает типы сущностей (классы), n-арные типы отношений (ассоциации), и множественность ограничений. Он основывается на задаче нахождения решений системы линейных неравенств, для которых переменными являются количество экземпляров для типов сущностей и типов отношений;

– *метод детектирующих (идентификационных) графов*. В методе используется ориентированный граф, узлы которого соответствуют классам и ассоциациям классовой диаграммы, а его дуги соединяют ассоциативные узлы с соответствующими им классовыми узлами. Цикл графа, вес которого меньше 1, указывает на невыполнимый набор ограничений;

– для объяснения причин некорректности и корректировки диаграмм классов также используется *метод шаблонов*. Правильнее сказать, что данный метод основывается на *антишаблонах* – плохих решениях типичных проблем. Они указывают на отрицательные проектные решения и предлагают различные способы избавления от этих решений;

– *метод множеств.* Согласно данному методу каждый класс, входящий в состав иерархии, представляется в виде множества. Далее создается система неравенств, в которую включаются все возможные неравенства и равенства, если такие имеются, между классами-множествами. Затем необходимо решить систему неравенств и если результатом станет не пустое подмножество, то данная иерархия классов построена корректно, если же пустое множество – иерархия классов не корректна.

Что касается диаграмм последовательности, то существует три основных метода их верификации:

– *метод протоколов.* Идея данного метода заключается в том, что сообщения, находящиеся на диаграмме классов, сопоставляются с методами из диаграммы классов, после чего осуществляется проверка, соответствует данное сообщение какому-либо методу диаграммы классов или нет. В случае отсутствия соответствия, верификация не проходит;

– *метод создания тестового драйвера.* Суть метода состоит в том, что если объекту приходит какое-либо сообщение до сообщения о создании или после сообщения об удалении, то верификация не проходит. Также верификация не проходит в случае, если синхронное сообщение не получает последующего ответа;

– *метод сценариев*. Идея метода состоит в том, чтобы представить диаграмму в виде конечного автомата и тестировать его согласно определению и его свойствам [4].

Модуль обработки данных

В данном модуле происходит непосредственная идентификация ошибок, а также получение результата о правильности диаграммы в целом.

Пользовательский интерфейс

Тут происходит оптимизация результатов и реализация удобного пользовательского интерфейса.

Выводы и предложения. Рассмотрев указанные продукты, позволяющие осуществлять верификацию диаграмм, можно утверждать, что TAUG2 от Telelogic, Enterprise Architect и Visual Paradigm более эффективные и продвинутые по сравнению с AgroUML,так как они полностью завершены и поддерживают стандарт UML 2.0. Однако AgroUML является бесплатным, кроссплатформенным и открытым, что существенно упрощает доступ к нему. Тем не менее его незавершенность, а также отсутствие оптимальных поддержек многих диаграмм не позволяет использовать его как основное средство для проектирования диаграмм.

На основании рассмотренных вышесуществующих средств верификации можно предположить, что они не являются полноценными и не предоставляют полной картины корректности диаграммы. В связи с этим предлагается новое средство верификации UMLTester, которое является бесплатным, обеспечивает верификацию несколькими методами и позволяет максимально точно оценить корректность диаграммы.

Список использованных источников

1. *Режим* доступа: http://argouml.tigris.org/.
2. *Режим* доступа: http://www.visual-paradigm.com/.
3. *Макгрегор Дж.* Тестирование объектно-ориентированного программного обеспечения : практическое пособие / Дж. Макгрегор, Д. Сайкс ; пер. с англ. – К. : ООО «ТИД ”ДС“», 2002. – 432 с.
4. *Хоар Ч.* Взаимодействующие последовательные процессы / Ч. Хоар ; пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 264 с.

УДК 004.82(045)

А.І. Вавіленкова, канд. техн. наук
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТЕКСТОВИХ ДОКУМЕНТІВ, ІДЕНТИЧНИХ ЗА ЗМІСТОМ

А.И. Вавиленкова, канд. техн. наук
Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ, ИДЕНТИЧНЫХ ПО СМЫСЛУ

A.I. Vavilenkova, Candidate of Technical Sciences
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

SOFTWARE FOR DETECTION OF TEXT DOCUMENTS IDENTICAL IN CONTENT

Проаналізовано основні методи, що лежать в основі відкритого програмного забезпечення з виявлення дублікатів електронних документів, зазначено їх недоліки: відсутність компоненти семантичного та змістовного аналізу текстів. Запропоновано систему автоматизованого формування логіко-лінгвістичних моделей як допоміжний механізм вилучення змісту з речень природної мови, на основі якого можна вирішити проблему екстракції знань з текстової інформації.

Ключові слова: *текстові документи, семантичний аналіз, логіко-лінгвістичні моделі, аналіз тексту, дублікати, природна мова.*

Осуществлен анализ основных методов, которые лежат в основе открытого программного обеспечения по выявлению дубликатов электронных документов, определены их недостатки: отсутствие компоненты семантиче-

ского и смыслового анализа текстов. Предложена система автоматизированного формирования логико-лингвистических моделей как вспомогательный механизм извлечения содержания из предложений естественного языка, на основе которого можно решить проблему экстракции знаний из текстовой информации.

Ключевые слова: *текстовые документы, семантический анализ, логико-лингвистические модели, анализ текста, дубликаты, естественный язык.*

The basic techniques underlying open source software to detect duplicates, butchers electronic documents indicated their shortcomings: lack of semantic component and component of content analysis of texts. The system of automated creation of logic-linguistic model as an auxiliary mechanism for extracting the contents of the sentences of natural language, from which you can solve the problem of extracting knowledge from text information.

Key words: *text documents, semantic analysis, logic-linguistic models, text analysis, duplicate, natural language.*

Постановка проблеми. Щоразу під час перевірки дипломних, курсових, дисертаційних робіт, звірки різноманітних нормативних документів виникає потреба у здійсненні їх порівняння для знаходження збігів та суперечностей з метою виявлення і запобігання використанню ідентичних текстів. З проблемою визначення збігів у текстових документах зіштовхуються у тих сферах діяльності, де кінцевим результатом є текстовий документ. Це, в першу чергу, освіта, наука, законотворчість, патентування, інноваційна та інша діяльність, пов'язана із захистом інтелектуальної власності.

З появою сьогодні величезної кількості веб-документів у мережі Інтернет виникають проблеми у функціонуванні пошукових машин. Релевантність інформації, отриманої на запит навіть найдосконаліших пошукових систем *Google* та *Yandex*, дуже низька. Отримані на запити відповіді містять велику кількість копій веб-документів.

Все це говорить про те, що існуючі алгоритми пошуку текстових збігів не здатні опрацьовувати електронні документи за змістом. Більшість методик, на основі яких працюють сучасні пошукові машини, базуються на таких статистичних методах, як метод «шинглів», алгоритм Карпа-Рабіна, алгоритм Кнута-Морріса-Пратта, метод лексичних сигнатур. Це дозволяє виявити в електронних документах ідентичні за написанням фрагменти, проте не дає можливості говорити про тотожність документів, якщо текстова інформація перефразована, у тексті вжиті синоніми, омоніми, інверсний порядок слів і т. д.

Таким чином, для виявлення текстових документів, ідентичних за змістом, необхідно розроблення якісно нових алгоритмів лінгвістичного та семантичного аналізу. Зокрема, існуюча у лінгвістів теоретична база аналізу семантико-синтаксичних структурних одиниць тексту слабо структурована. Тому розроблення програмного забезпечення для знаходження змістовних текстових збігів потребує, в першу чергу, формалізації інформації щодо побудови текстів, формування у них логічних зв'язків та створення методів автоматичного семантичного аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження показали, що ні коди бібліотечних класифікаторів, ні назва текстового документа, ані множина слів, які найчастіше трапляються у тексті, у більшості випадків недостатньо адекватні або зовсім неадекватні його змісту. Тому під час їх використання як критерій добору текстів стандартний пошуковий сервер видає величезний обсяг інформації, більша частина якої немає ніякого відношення до тематики тексту, що підлягає аналізу [1].

Перші теоретичні спроби формалізувати процес здійснення семантичного аналізу тексту робить В.А. Звегінцев [2], а згодом Е.В. Попов у своїй роботі [3], де формулює принципи побудови неструктурованого та структурованого семантичного графу речення. У роботі [4] В.А. Звегінцев намагається узагальнити всі відомі знання з когнітивних аспектів мови, які публікують такі іноземні вчені, як Дж. Лакофф, Ч. Філлмор, Д. Шпербер, Д. Уілсон, Т.А. ван Дейк.

У книзі І.А. Мельчука [5] проведено глибокий аналіз тексту, описано етапи побудови моделі «зміст-текст», обговорено семантичне представлення висловлювань та універсальні правила перефразування. Роботи провідних вітчизняних науковців [6; 7] у

сфері лексикографії та комп'ютерної лінгвістики описують теорію семантичних станів мовних одиниць.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Всі перераховані вище матеріали носять теоретичний характер. А в основі відкритого програмного забезпечення щодо пошуку дублікатів серед електронних документів відсутнє таке, в основі якого лежало б змістовне оброблення текстової інформації.

Мета статті. Метою роботи є аналіз методів, що лежать в основі відкритого програмного забезпечення з виявлення ідентичних текстових документів; розроблення принципів функціонування систем аналізу електронних текстів за змістом; демонстрація роботи системи автоматизованого формування логіко-лінгвістичних моделей текстової інформації.

Виклад основного матеріалу. Існуючі відкриті системи порівняльного аналізу текстової інформації, такі як *Advego Plagiatus*, *Shingles Expert*, *Compare It!*, *IsEqual*, а також системи, що здійснюють повнотекстовий пошук та аналітичне оброблення текстів, містять у своїй основі спільні механізми вилучення знань з текстової інформації та базуються на статистичних методах. Розглянемо основні принципи функціонування програмних систем пошуку дублікатів серед електронних документів.

Порівняння – це співставлення об'єктів з метою виявлення спільних рис або різниці між ними. Прийом порівняння використовується у процесі узагальнення, коли необхідно виявити тотожності, збіги та суперечності в об'єктах дослідження. Тут тотожність – це повноцінне співпадіння всіх ознак; збіг – співпадіння ознак, починаючи з однієї; суперечності – коли ознаки одних об'єктів відсутні в інших. Для здійснення порівняння необхідні ознаки, що визначають можливі відношення між об'єктами.

Одним із методів, що застосовується для виявлення кластерів документів, які володіють схожими властивостями лише за деякими ознаками, наприклад, словами чи зображеннями, є ***бікластеризація***. Метод застосовується для здійснення запитів та індексації повнотекстових систем. Початкові дані являють собою матрицю, в якій рядки відповідають за слова, а стовпчики – за документи. Для кластеризації документів враховується число входжень слова до документа, загальна кількість документів та кількість документів, що містить певне слово [1]. Таким чином слова можуть бути кластеризовані на основі документів, в яких вони трапляються. Кластери зручні для автоматичної побудови статистичних тезаурусів, уточнення запитів та автоматичної класифікації документів, проте здійснити змістовний аналіз тексту з використанням кластерів неможливо.

Advego Plagiatus – програмний продукт, що дозволяє здійснити семантичний аналіз тексту он-лайн, знаходячи при цьому семантичне ядро, а також дає можливість перевірити електронний документ на унікальність відносно веб-документів, які знаходяться у відкритому доступі в мережі Інтернет.

Нехай на вхід системи подано текст (рис. 1). Результат перевірки введеного тексту на унікальність (рис. 2) містить відсоток знайдених збігів, а також наведено посилання на сайти, де є схожий текст. Але, якщо проаналізувати введений текст детальніше, можна побачити, що збіги знайдено лише у назві літератури, на яку наведене посилання. Таким чином, змістовних збігів система не повинна була знайти. Це означає, що здійснено не семантичний розбір за змістом, а системою *Advego Plagiatus* використано статистичний метод пошуку тотожних виразів.

Пошук нечітких дублікатів передбачає кластеризацію документів за схожістю їх певних характеристик, а реалізація алгоритму складається з таких кроків:

– канонізація кроків – на цьому етапі текст очищується від непотрібних слів, що не несуть зміст під час порівняння, тобто текст приводиться до канонічної форми;

– розбиття тексту на шингли;

– знаходження контрольних сум – унікальних чисел, кожному з яких ставиться у відповідність деякий текст та функція його обчислення. Потім із всієї множини контрольних сум (їх кількість дорівнює кількості слів у документі мінус $(w-1)$, де w – число слів у шинглі) відбираються лише ті, які діляться на певне вибране завчасно число;

– пошук однакових послідовностей – один шингл, який співпав під час відбору, приблизно відповідає наперед заданому числу однакових частин у повному тексті.

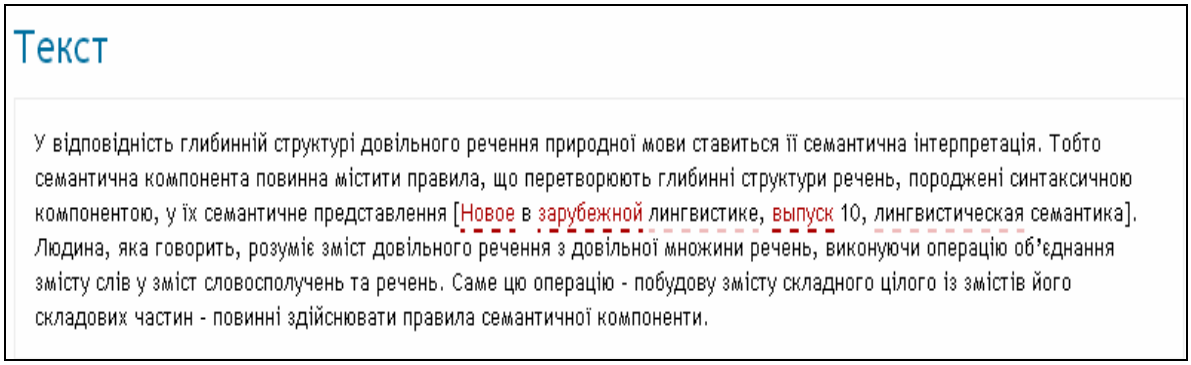


Рис. 1. Введення тексту для аналізу програмою Advego Plagiatus

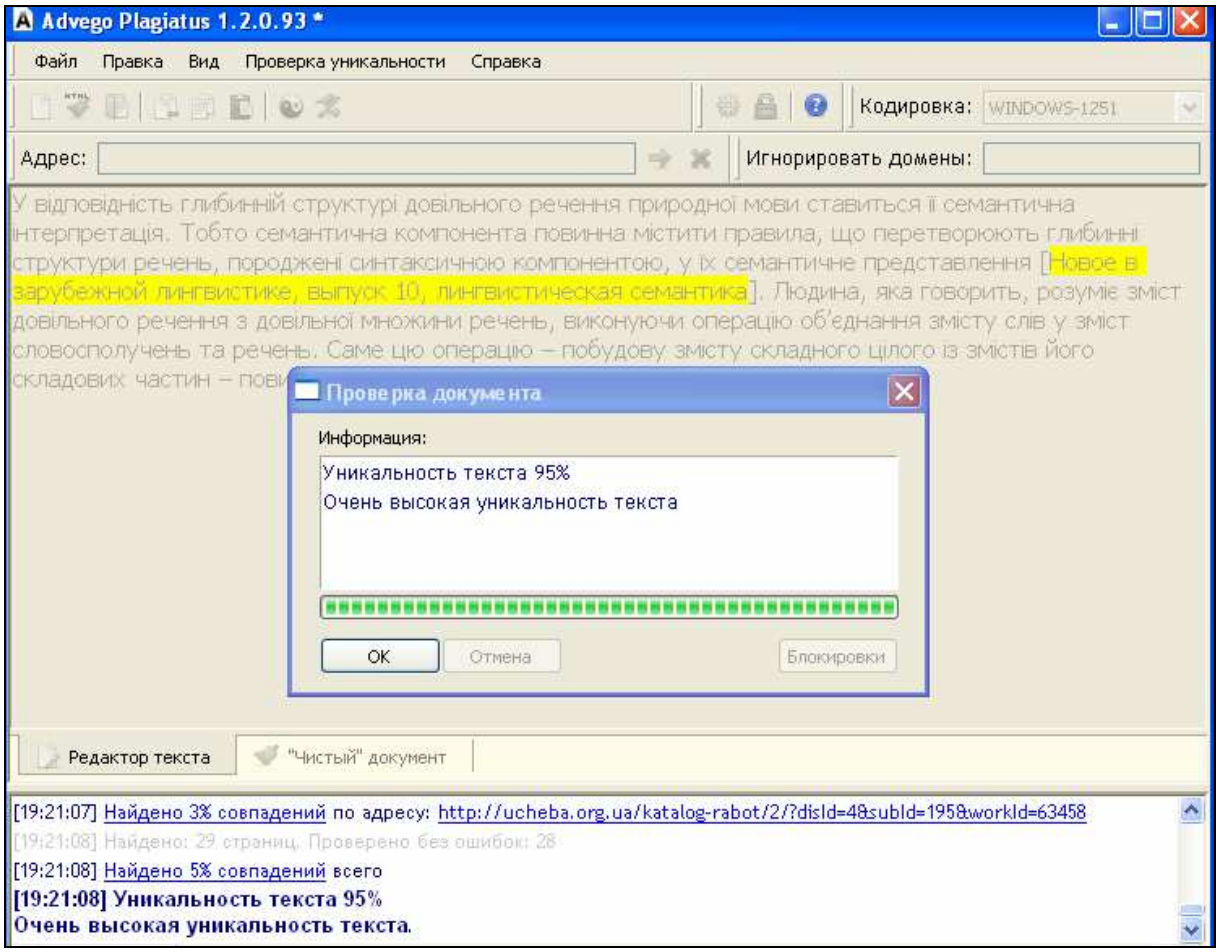


Рис. 2. Семантичне ядро введеного тексту в програму Advego Plagiatus

Пошук нечітких дублікатів лежить в основі функціонування системи порівняльного аналізу *Shingles Expert* (рис. 3).

На вхід системи подано два абсолютно різних за змістом тексти, в яких часто трапляються такі слова, як «контент» та «система управління контентом». Саме завдяки виявленню цих ключових слів в обох текстах система, яка працює на основі статистично-

го методу шинглів, видала відсоток збігів – 35 %. Експеримент показав, що тексти не аналізуються за змістом.

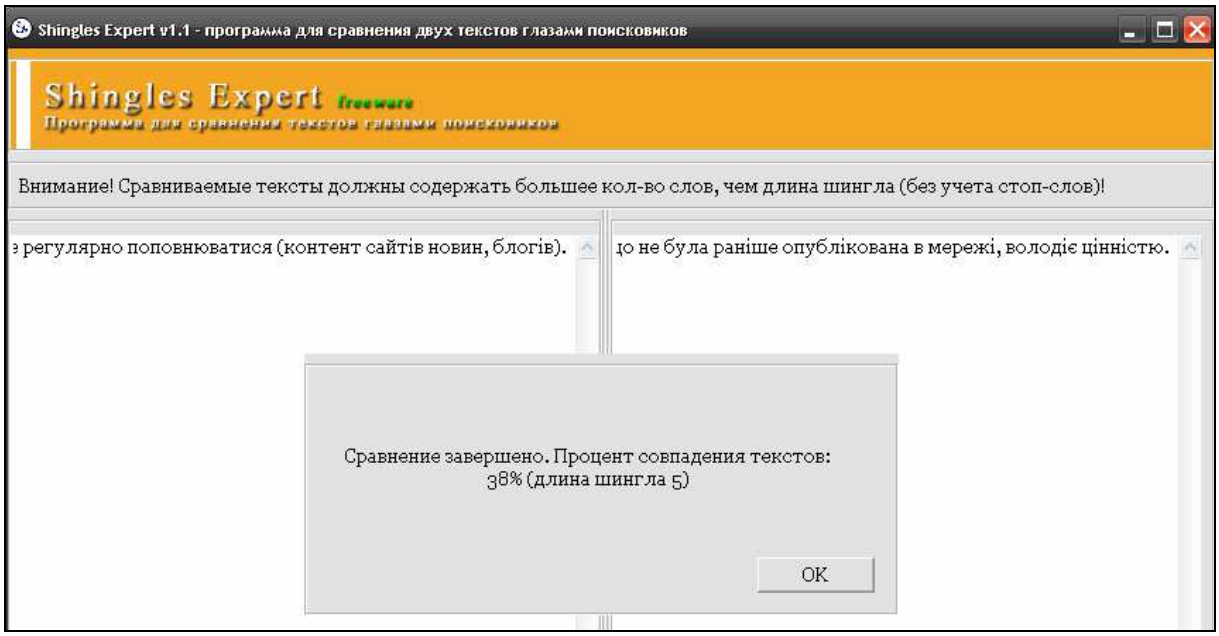


Рис. 3. Результат порівняння текстів системою Shingles Expert

Лексико-синтаксичні шаблони являють собою характерні вирази (словосполучення або звороти), конструкції із відповідних елементів природної мови. Такі шаблони дозволяють побудувати семантичну модель тексту. Передбачається, що саме за допомогою шаблонів (зразків) можна описати лексичні відношення в документі. Такий метод використовує ієрархію шаблонів, що складаються з індикаторів частин мови та групових символів.

Таким чином, аналіз програмного забезпечення, що використовується для виявлення текстових документів, показав недосконаліть методів, які лежать в основі сучасних систем автоматичного аналізу. Отже, існує потреба у створенні такого програмного забезпечення, яке б використовувало методи глибокого лінгвістичного оброблення. Це дасть можливість порівнювати текстові документи за змістом.

Програмним забезпеченням, яке дозволяє вилучати зміст з речень природної мови є система автоматизованого формування логіко-лінгвістичних моделей (САФЛЛМ). Вона являє собою прикладну програму, яка виступає засобом формування бази знань аналітичної системи порівняльного аналізу. Тобто система САФЛЛМ виконує функції допоміжного механізму, що використовується для визначення набору логіко-лінгвістичних моделей ключових речень, які максимально точно відображають зміст тексту, що підлягає подальшому аналізу, і вирішує проблему екстракції знань з текстової інформації. В основу роботи цієї системи покладено відповідність між формулами логіки предикатів та концептами, що належать реальному світу. Таким чином, САФЛЛМ є прикладним засобом, який використовується в системі порівняльного аналізу електронних текстів, утворюючи для неї базу знань у вигляді набору логіко-лінгвістичних моделей, що відображають семантико-синтаксичну структуру речень.

Система автоматизованого формування логіко-лінгвістичних моделей функціонує таким чином.

1. На вхід системи користувачем вводиться речення природної мови (рис. 4). Під час натискання кнопки «Модель» на екран буде виведено логіко-лінгвістичну модель – результат перетворення текстової інформації у формулу.

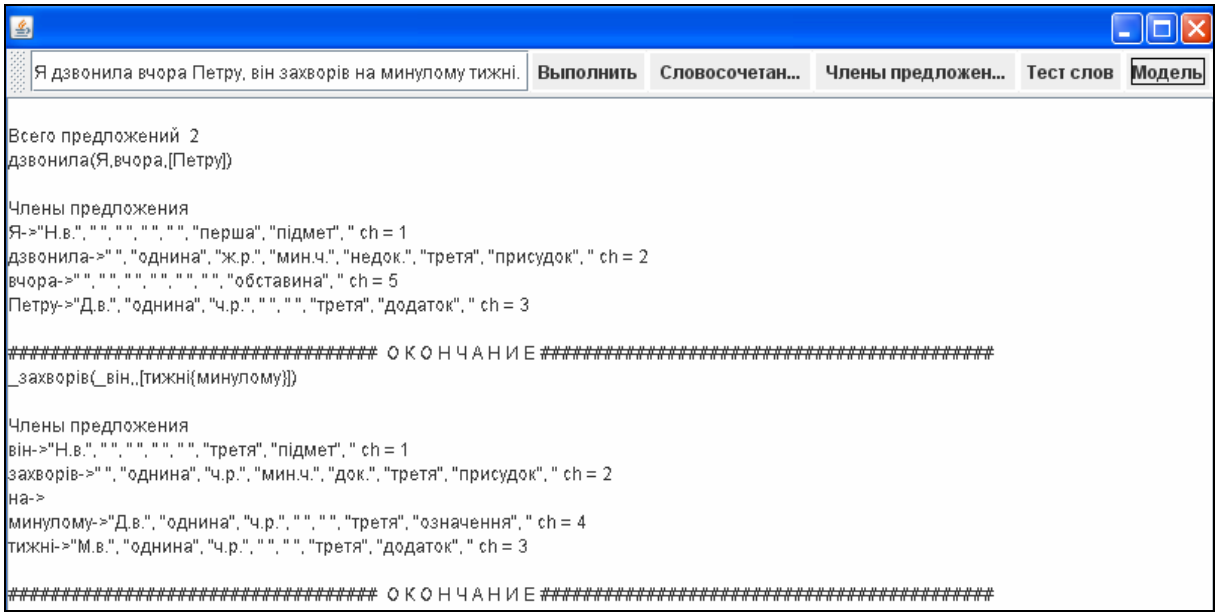


Рис. 4. Результат роботи САФЛЛМ

2. З рис. 4 видно, що система розпізнала введене речення як складне і розбила його на два, для кожного з яких створено формулу, де

– «дзвонила» – предикат, що відображає зміст першого речення;

– «я» – предикатна змінна (суб'єкт), що знаходиться у предикативному відношенні з предикатом «дзвонила»;

– «вчора» – предикатна константа, що вказує на ознаку дії;

– «Петру» – предикатна змінна (аргумент);

– «захворів» – предикат, що відображає зміст другого речення;

– «він» – предикатна змінна (суб'єкт), що знаходиться у предикативному відношенні з предикатом «захворів»;

– «тижні» – предикатна змінна (аргумент);

– «минулому» – предикатна константа, що вказує на ознаку аргументу «тижні».

3. Під час натискання кнопки «Виконати» система виводить на екран характеристики кожного слова (простого елемента формальної системи) (рис. 5).

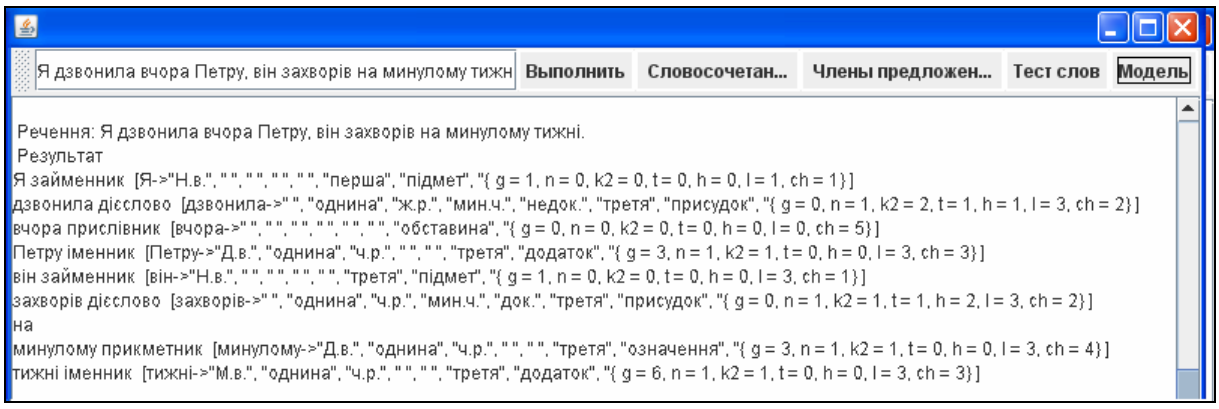


Рис. 5. Результат роботи САФЛЛМ після натискання кнопки «Виконати»

4. Кнопка «Словосполучення» дасть змогу отримати всі складні елементи формальної системи (рис. 6).

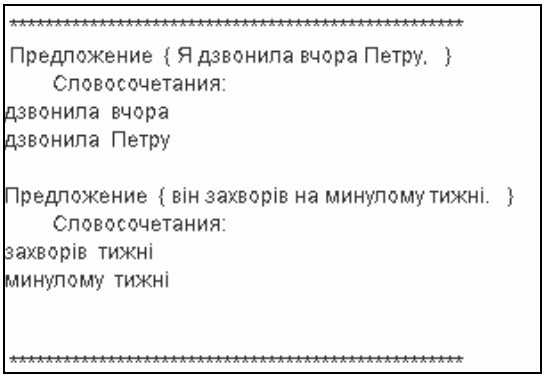


Рис. 6. Результат роботи САФЛЛМ після натискання кнопки «Словосполучення»

5. Кнопка «Члени речення» дасть можливість отримати синтаксичні ролі простих елементів формальної системи (рис. 7):

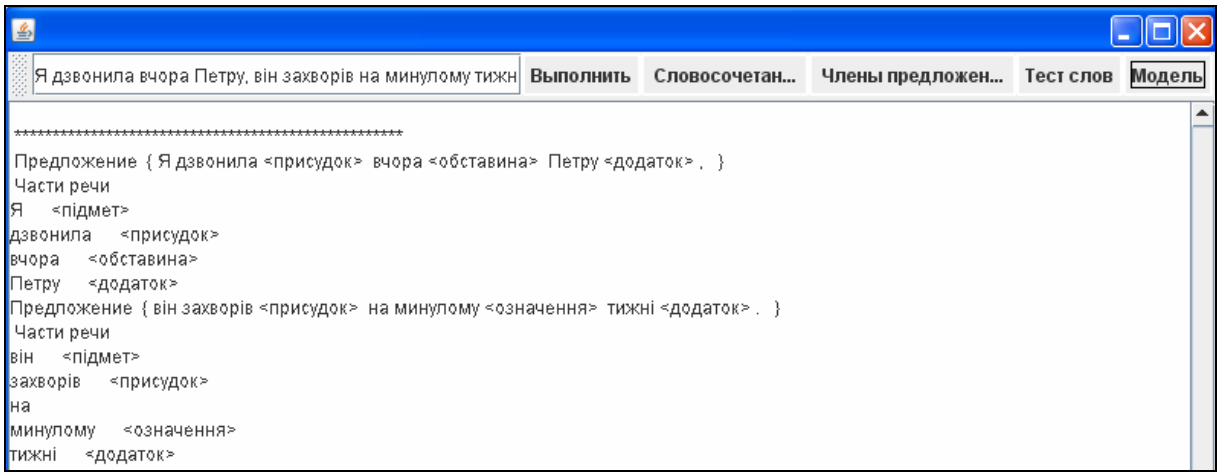


Рис. 7. Синтаксичні ролі слів у введеному реченні

Отримані внаслідок автоматизованої побудови логіко-лінгвістичні моделі близькі до природної мови, вирішують проблему структурної лінгвістики – завдання опису того, як будь-який текст, написаний конкретною мовою, може бути породжений з одиниць мови за допомогою кінцевого набору формальних правил роботи з цими одиницями (словами). Побудова таких моделей надалі може використовуватися для порівняння текстів, машинного перекладу, вилучення знань з текстової інформації та відшукання в ній суперечностей.

В основу роботи системи САФЛЛМ покладено метод автоматизованої побудови логіко-лінгвістичних моделей текстової інформації. На відміну від статистичних методів, він дозволяє виявити зміст речень і використовує при цьому набір правил побудови зв’язків у реченнях природної мови. Для флективних мов набір правил обмежений, тому цю інформацію можна формалізувати. База знань системи САФЛЛМ побудована на основі використання множини продукцій, кожна з яких відповідає одному з правил. Так, САФЛЛМ використовує тридцять одне правило формування словосполучень, тридцять два правила визначення граматичної основи речень та двадцять одне правило визначення типів складних речень для української мови.

Використання інформації щодо можливих типів зв’язків між реченнями, абзацами, частинами документа дозволить створити аналогічний набір правил побудови будь-якого текстового документа. А отримані практичні результати роботи системи САФЛЛМ дозволяють висувати гіпотези відносно того, як породжується мова людиною. Якщо певна модель достатньо простим і логічним способом породжує фрази природної мови, то можна припустити, що аналогічним чином працює і мозок людини.

Висновки і пропозиції. Використання технологій оброблення текстової інформації є перспективним напрямом для вирішення завдань оцінювання відповідності програмного забезпечення вимогам безпеки. Це дозволить підвищити ефективність проведення, скоротити час та вартість сертифікаційних досліджень, покращить процедуру сертифікації [8]. У сфері бізнесу необхідні системи прогнозування популярності характеристик тих чи інших продуктів (машин, літаків, засобів телекомунікації, побутової техніки та ін.), системи, що відслідковуватимуть політику гарантій та постійних клієнтів. Здійснення аналітичного оброблення текстової інформації необхідне в медицині для постановки діагнозів. Пошукові системи використовують алгоритми пошуку дублікатів текстових документів з метою індексування тільки унікальних веб-ресурсів. Тобто майже всі галузі знань, науки і техніки через складність своєї системної організації потребують інтелектуального оброблення даних. Автоматичне оброблення природної мови базується на послідовному аналізі мови як ієрархічної системи. Етапи аналізу природномовного тексту відповідають рівням структури мови: лексичний, морфологічний, синтаксичний, семантичний та прагматичний аналіз тексту. Тому лише методи оброблення текстової інформації, реалізація яких передбачає здійснення всіх етапів аналізу, можуть претендувати на проведення змістовного аналізу електронних документів.

Список використаних джерел

1. *Ландэ Д. В.* Поиск знаний в Internet. Профессиональная работа / Д. В. Ландэ. – М. : Вильямс, 2005. – 272 с.

2. *Звегинцев В. А.* Новое в зарубежной лингвистике. Вып. 10. Лингвистическая семантика / В. А. Звегинцев. – М. : Прогресс, 1981. – 568 с.

3. *Попов Э. В.* Общение с ЭВМ на естественном языке / Э. В. Попов. – М., 1982. – 360 с.

4. *Звегинцев В. А.* Новое в зарубежной лингвистике. Вып. 23. Когнитивные аспекты языка / В. А. Звегинцев. – М. : Прогресс, 1988. – 320 с.

5. *Мельчук И. А.* Опыт теории лингвистических моделей «СМЫСЛ-ТЕКСТ» / И. А. Мельчук. – М. : Школа «Языки русской культуры», 1999. – 346 с.

6. *Широков В. А.* Семантичні стани мовних одиниць та їх застосування в когнітивній лексикографії / В. А. Широков // Мовознавство. – 2005. – № 3-4.

7. *Широков В. А.* Інформаційна теорія лексикографічних систем / В. А. Широков. – К. : Довіра, 1998. – 331 с.

8. *Беляков И. А.* Применение интеллектуальных технологий в процессе сертификации программного обеспечения / И. А. Беляков, М. А. Еремеев // Молодой ученый. – 2011. – № 11, т. 1. – С. 23-31.

УДК 681.84.083

М.Б. Гумен, канд. техн. наук
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СФЕРИ ЇХ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Н.Б. Гумен, канд. техн. наук
Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ОБЛАСТИ ИХ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

M.B. Humen, Candidate of Technical Sciences
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

METHODS OF COMPUTER PROCESSING OF IMAGES AND AREA OF THEIR RATIONAL USE

Розглянуто методи комп'ютерного оброблення зображень та сфери їх раціонального застосування. Проаналізовано лінійне контрастування, корекцію динамічного діапазону, перетворення гістограм, фільтрацію зображень, виділення границь. Проаналізовано та виявлено основні недоліки та переваги кожного з методів комп'ютерного оброблення зображень.

Ключові слова: *оброблення зображень, методи, характеристики зображень.*

Рассмотрены методы компьютерной обработки изображений и области их рационального применения. Исследовано линейное контрастирование, коррекцию динамического диапазона, преобразование гистограмм, фильтрацию изображений, выделение границ. Проанализированы и выявлены основные недостатки и преимущества каждого из методов компьютерной обработки изображений.

Ключевые слова: *обработка изображений, методы, характеристики изображений.*

The methods of the computer processing of images and their rational application domain are considered in this article. Investigational linear contrasting, correction of dynamic range, transformation of histograms, filtration of images, selection of scopes. Analysed and exposed basic failings and advantages each of methods of the computer processing of images.

Key words*: processing of images, methods, descriptions of images.*

Вступ. Сьогодні важко уявити сферу діяльності, в якій можна обійтися без комп'ютерного оброблення зображень. Інтернет, мобільний телефон, відеокамера, фотоапарат, сканер, принтер стрімко увійшли в наш побут. Комп'ютерне оброблення зображень застосовується в задачах експертизи живопису неруйнівними методами, у промисловості, медицині, космічній галузі, під час управління процесами, автоматизації виявлення і супроводу об'єктів, розпізнаванні образів, під час аналізу місцевості, розвідці корисних копалин, у системах протипожежної безпеки, контролі якості виробленої продукції, для відновлення старих фільмів тощо.

Під час комп'ютерного оброблення зображень вирішується велика кількість завдань, таких як поліпшення якості зображень; вимірювання параметрів; спектральний аналіз багатовимірних сигналів; розпізнавання та стиснення зображень. Тому дуже важливо володіти сучасними комп'ютерними методами оброблення зображення та раціонально застосовувати їх в усіх сферах діяльності людей.

Методи та результати досліджень. У багатьох комп'ютерних системах результати оброблення даних подаються у вигляді зображення на екрані. При цьому одержувачем інформації є спостерігач. Процедуру, що забезпечує таке подання, називають візуалізацією. Бажано за допомогою оброблення надати виведеному зображенню такі якості, завдяки яким його сприйняття людиною було б по можливості комфортним. Для реалізації зазначеної мети застосовуються методи, в яких здійснюється тільки поелементне оброблення. У цьому випадку результат оброблення в будь-якій точці кадру залежить тільки від значення вхідного зображення в цій же точці. Очевидною перевагою таких процедур є їх гранична простота.

Поелементне оброблення означає, що існує однозначна функціональна залежність

$$g(n,m) = \varphi[f(n,m)], \quad (1)$$

де $f(n,m)$ і $g(n,m)$ – значення яскравості необробленого (вхідного) й одержуваного після оброблення (вихідного) зображень відповідно в точці кадру, що має декартові координати *n* (номер стовпця) і *m* (номер рядка).

Лінійне контрастування. Слабкий контраст – найбільш поширена властивість ТВ та ІЧ зображень, зумовлене умовами спостереження, обмеженням діапазону відтворюваної яскравості. Під час лінійного контрастування реалізується лінійне поелементне перетворення $g(n,m) = af(n,m) + b$. Для заданих значень мінімальної $g_{\min}$ та максимальної $g_{\max}$ вихідної яскравості

$$g(n,m) = [(f - f_{\min})(g_{\max} - g_{\min})] / (f_{\max} - f_{\min}) + g_{\min}, \quad (2)$$

де $f_{\min}$ та $f_{\max}$ – мінімальна і максимальна яскравості вхідного зображення.

Корекція динамічного діапазону. Відомо, що при недостатньому освітленні формуються зображення з обмеженим динамічним діапазоном. Корекція певного діапазону яскравості $[f_{\text{л}}, f_{\text{п}}]$ проводиться перетворенням, передатна характеристика якого має форму, зображену на рис. 1. При цьому інші ділянки виявляються представленими певним «сірим» фоном (мають яскравість, що відповідає рівню $g_{\min}$).

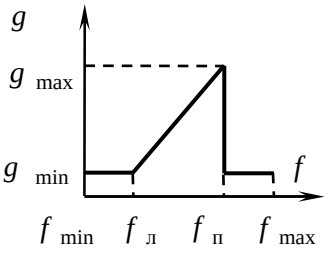


Рис. 1. Передатна характеристика

Перетворення гістограм. Під час поелементних перетворень відбувається зміна закону розподілу ймовірностей зображення. Лінійне контрастування зберігає вигляд функції щільності ймовірності, проте в загальному випадку змінює її параметри. Під час вирішення практичних задач оброблення зображень може бути поставлено завдання: за відомими функціями щільності ймовірностей $p(f)$ і $p(g)$ визначити потрібне перетворення $g = \varphi(f)$.

Встановлено, що для рівномірного закону розподілу

$$g(n,m) = (g_{\max} - g_{\min})\, p(f) + g_{\min}. \quad (3)$$

Таким чином, перетворення (3) передбачає знання закону розподілу вхідного зображення. Як правило, достовірних відомостей про нього немає. Тому на практиці перетворення розподілів виконують у два етапи. На першому етапі спочатку визначається гістограма вхідного зображення за шкалою його яскравості, а потім на її основі оцінка $p(f)$. На другому виконується саме нелінійне перетворення (3). Зазначимо, що процедури перетворення гістограм можуть застосовуватися як до зображення в цілому, так і до окремих його фрагментів.

Переважна більшість процедур оброблення для отримання результату в кожній точці кадру використовує вхідні дані з деякої безлічі точок вхідного зображення, що оточують оброблювану точку. Це методи непоелементного оброблення зображень.

Фільтрація зображень. Зображення здійснюється у просторовій і частотній областях. Застосування процедур фільтрації приводить до істотного зниження рівня шуму в зображенні. Під час просторової фільтрації перетворення виконується безпосередньо над значеннями відліків зображення. Ідеологія просторової фільтрації ґрунтується на використанні як даних для поточної точки, так і області навколо неї.

Як просторова фільтрація у практиці цифрового оброблення зображень широко застосовується маскова фільтрація. Як маски, використовується безліч вагових коефіцієнтів, заданих для всіх точок, що зазвичай симетрично оточують поточну точку кадру в певній області. Поширеною формою такої області є квадрат 3×3 з поточним елементом у центрі. Одним із варіантів є рівномірна маска, всі дев'ять вагових коефіцієнтів якої

дорівнюють 1/9. Такий вибір коефіцієнтів відповідає умові збереження середньої яскравості.

Лінійна просторова фільтрація ґрунтується на операції двовимірної згортки імпульсної характеристики (ІХ) фільтра $h(s,t)$ із зображенням $f(x,y)$, де s – координата характеристики в горизонтальному напрямку вздовж осі x, $s \in [-n/2, n/2]$, t – координата характеристики у вертикальному напрямку вздовж осі y, $t \in [-m/2, m/2]$. Маскою такого фільтра є прямокутна область розміром $n \times m$, на якій задана імпульсна характеристика. Відгук фільтра $g(x,y)$ у цьому разі визначається сумою добутків відліків зображення на відповідні відліки дзеркального відображення ІХ. Лінійна фільтрація широко застосовується під час придушення шумів у зображенні, для компенсації нерівномірності чутливості, створення ефектів розмиття зображень, у задачах виділення контурів на зображенні, підкреслення верхніх просторових частот.

Нелінійна просторова фільтрація. В результаті застосування лінійних фільтрів відбувається послаблення шумів, але одночасно розмиваються межі між областями з різною амплітудою сигналу. Для підвищення чіткості границь розроблені різні нелінійні фільтри, які функціонують у ковзному вікні і виконують нелінійні перетворення відліків зображення за певною маскою фільтра. Так, у *сигма фільтрі* центральний елемент маски подається зваженим середнім значенням, яке обчислюється за амплітудами відліків яскравості, значення яких потрапляють в область S навколо центрального елемента:

$$S = \{(s,t) : |f(x-s, y-t) - f(x,y)| \le k\sigma,$$

де σ – середньоквадратичне відхилення (СКВ) шуму або СКВ у масці, або СКВ зображення.

Найбільш ефективними за сукупністю факторів: згладжування шуму на однорідних ділянках зображення, збереження стрибків змін яскравості, мінімального спотворення форми границь, послаблення імпульсного шуму, обчислювальної ефективності є *медіанні фільтри*.

Медіанний фільтр (МФ), запропонований Тьюкі в 1974 р., подає центральний елемент маски медіаною впорядкованої вибірки, сформованої з усіх амплітуд відліків, що покриваються маскою фільтра. Під час медіанної фільтрації використовується ковзне двовимірне вікно непарної розмірності $m \times n$. Відліки зображення, що опинилися в межах вікна, утворюють робочу вибірку поточного відліку. Для упорядкованої зростаючої послідовності $\{f_i,\ i = 1,..., mn\}$ медіаною буде той елемент вибірки, який займає серединне положення в ній. Цей елемент і визначає результат медіанної фільтрації для цієї точки кадру.

Звичайні МФ спричинюють приглушення ВЧ складової зображення, і, як наслідок, – розмивання країв і текстур. Застосування адаптивних МФ зі змінюваною ІХ залежно від локального значення сигналу зображення дає змогу видалити біполярну імпульсну заваду, забезпечити згладжування шумів і зменшити приглушення ВЧ у зображенні.

МФ фільтр відноситься до рангових фільтрів. Так, вибір мінімального відліку в масці (ранг дорівнює 1) дає змогу виконати ерозію, а максимального (ранг дорівнює mn) – дилатацію. Ці операції широко використовуються в морфологічному обробленні зображень.

Частотна фільтрація зображень забезпечується застосуванням частотних фільтрів із потрібною частотною характеристикою. Зазвичай, це фільтри Баттерворта, Чебишева, Лежандра, Беселя тощо.

Виділення границь. Границі – це такі криві на зображенні, вздовж яких відбувається різка зміна яскравості або її похідних за просторовими змінними. Найбільш цікавими є зміни яскравості, які відображають важливі особливості зображуваної поверхні. До них відносяться місця, де орієнтація поверхні змінюється стрибкоподібно, або один

об'єкт загороджує інший, або розміщується границя тіні, або відсутня безперервність у відбивних властивостях поверхні тощо. У будь-якому разі потрібно локалізувати місця розривів яскравості, а отже і ділянки, де можна виявити фрагмент краю. Інтуїтивно краєм, зазвичай, є границя між двома областями, кожна з яких має приблизно рівномірну яскравість. Традиційними способами вирішення зазначеної проблеми є *градієнтні методи на прямій та площині*.

Комп'ютерне дослідження розглянутих методів покращення зображення в середовищі MATLAB дало змогу виробити певні рекомендації щодо їхнього застосування у системах цифрового оброблення зображень, використовуваних у різних сферах людської діяльності.

Так, у космічній галузі, зважаючи на те, що зображення, отримані за допомогою космічних засобів дистанційного зондування Землі, відіграють виключно важливу роль у наукових дослідженнях, промислових, господарських, військових сферах, доцільним є застосування таких методів покращення зображення, як контрастування, підкреслення границь, вирівнювання гістограми.

У медицині інтенсивно впроваджують різні електронні пристрої, які позитивно впливають на підвищення діагностики, лікування та профілактики захворювань. У більшості випадків, відеодані отримують за допомогою мікроскопії, рентгенографії, ангіографії, ультразвукових досліджень та томографії. Ці дані дають змогу виявляти пухлини, атеросклероз, оцінювати розміри органів, параметри кровообігу тощо. Цифрові системи оброблення зображень спрощують та прискорюють роботу, дають шанс скоротити час оброблення інформації, що може бути життєво важливим. Ось чому, наприклад, у медицині доцільно застосовувати такі методи покращення візуальної якості зображення, як підсилення локальних контрастів, фільтрацію, збільшення динамічного діапазону.

Для систем відеоспостереження, які функціонують, працюють у різних погодних умовах як вдень, так і вночі, часто при недостатньому освітленні для покращення зображення заслуговують на увагу методи вирівнювання гістограм, підкреслення границь, розширення динамічного діапазону, фільтрації, підсилення локальних контрастів.

Висновки. Комп'ютерне оброблення інформації – це один із найінтенсивніших напрямків розвитку, пов'язаний з автоматизацією систем, автоматичним аналізом отриманої інформації, що підвищує рівень безпеки та спрощує роботу людини. Значна частина задач оброблення інформації та аналізу даних пов'язана із зображеннями. Під час розгляду методів покращення зображень завжди гостро стоїть питання вибору критеріїв оцінювання якості їх перетворення.

Для покращення зображення у медицині доцільно застосовувати підсилення локальних контрастів, фільтрацію, збільшення динамічного діапазону, для аерокосмічних знімків – контрастування, підкреслення границь, вирівнювання гістограми, а у системах відеоспостереження – підкреслення границь, розширення динамічного діапазону, вирівнювання гістограм, фільтрації, підсилення локальних контрастів.

Список використаних джерел

1. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка зображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. *Зубарев Ю. Б.* Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы / Ю. Б. Зубарев, М. И. Кривошеев, И. Н. Красносельский. – М. : НИИР, 2001. – 568 с.

3. *Телевидение :* учебник для высших учебных заведений / А. А. Гоголь, В. Е. Джакония, Я. В. Друзин и др. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 616 с.

УДК 004.896

М.В. Двоєглазова, канд. техн. наук
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна
І.С. Скітер, канд. фіз.-мат. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ ІНТЕГРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

М.В. Двоеглазова, канд. техн. наук
Черниговский государственный институт экономики и управления, г. Чернигов, Украина
И.С. Скитер, канд. физ.-мат. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНТЕГРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

M.V. Dvoiehlazova, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Institute of Economic and Management, Chernihiv, Ukraine
I.S. Skiter, Candidate of Physics and Mathematical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF ARCHITECTURE OF SYSTEM OF SUPPORT OF MAKING DECISIONS FOR THE ANALYSIS OF INTEGRATION OF INFORMATIVE SYSTEMS

Розроблено систему підтримки прийняття рішень, що реалізують метод аналізу середовища функціонування, яка дозволяє визначати показники ефективності інформаційних систем підприємства та проекту, а також ефективність інтегрованої системи.

***Ключові слова**: система підтримки прийняття рішень, ефективність, інтеграція, інформаційні системи, метод аналізу середовища функціонування.*

Разработана система поддержки принятия решений, реализующих метод анализа среды функционирования, которая позволяет определять показатели эффективности информационных систем предприятия и проекта, а также эффективность интегрированной информационной системы.

***Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, эффективность, интеграция, информационные системы, метод анализа среды функционирования.*

A decision support system that implements the method of analysis of environmental performance and allows to determine the performance of enterprise information systems and design, as well as the effectiveness of an integrated information system.

***Key words:** decision support system, efficiency, integration, information systems, environmental analysis method of operation.*

Постановка проблеми. Аналіз взаємодії інформаційних систем може бути проведений на основі статистичних даних про структуру інформаційних систем підприємства та проекту, параметри їх входів та виходів [1]. Процедура визначення ефективності інтеграції інформаційних систем потребує значних часових та машинних ресурсів, тому ставиться задача автоматизації процесу пошуку параметра ефективності для інформаційних систем, що взаємодіють. У реальних задачах часто досліджуються складні системи з великою кількістю підсистем і елементів. Для вирішення подібних завдань необхідне програмне забезпечення (ПЗ), що реалізує ті чи інші методи дослідження ефективності систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Більшість широкодоступних програмних продуктів, призначених для оцінювання ефективності систем, реалізують метод аналізу середовища функціонування (АСФ). Відомі й дві розробки російських фахівців: EffiVision [2] і KonSi-DEA [3]. Основні інструменти, що застосовуються для розроблення подібних програмних продуктів, – це мови програмування Visual Basic, C, C++. Існуючі програмні продукти мають певні переваги в тому, що стосується різноманітності реалізованих моделей методу АСФ (DEA) та інтерфейсу користувача.

Проте їм властиві і недоліки. Зокрема, ці програмні продукти:

– реалізують тільки якийсь один метод дослідження ефективності;

– не є комплексними щодо реалізації всіх стадій дослідження ефективності: оцінювання досягнутого рівня, його пояснення, прогнозування, видачу рекомендацій щодо способів досягнення необхідного рівня;

– не дозволяють описати структуру складної системи та інтегрувати отримані оцінки в єдину оцінку ефективності складної системи;

– не використовують «великі» системи управління базами даних (СУБД), такі як Oracle, PostgreSQL, MySQL та ін., для зберігання даних і маніпулювання ними, що знижує надійність операцій з даними.

Мета статті. Головною метою статті є розроблення системи підтримки прийняття рішень, яка дозволяє визначати показники ефективності інформаційних систем, а також ефективність інтегрованої інформаційної системи.

Виклад основного матеріалу. На основі аналізу потреб користувачів і відповідно до зазначених принципів можна сформулювати такі вимоги до СППР:

1. Надання користувачеві можливості опису структури складної системи.

Структуру системи необхідно зберігати в базі даних у вигляді матриці, яка описує зв'язки елементів. При цьому необхідно зберігати інформацію про характеристики кожного такого зв'язку: спрямованість зв'язку (від першого елемента до другого, від другого до першого, двосторонній зв'язок); сила зв'язку (в обох напрямках); тип зв'язку (зв'язок управління, інформаційний зв'язок та ін.); вплив цього зв'язку на досягнення глобальної мети всієї системи і т. д.

2. Використання ієрархічного підходу при структуризації етапів дослідження.

За основу формування логіки роботи з програмним продуктом пропонується прийняти поняття «Дослідження». Це поняття означає всю сукупність дій з оброблення інформації у процесі проведення дослідження ефективності складної інформаційної системи. При цьому необхідно врахувати, що в межах одного «Дослідження» може досліджуватися більш однієї інформаційної системи. Аналогічно, одна і та ж інформаційна система може бути об'єктом більш одного «Дослідження». Кожне «Дослідження» може бути розділене на етапи, структура яких відображає структуру досліджуваної системи і враховує цілі та завдання дослідження. Для реалізації ідеї багатоваріантних розрахунків необхідно надати користувачу можливість формувати для кожного етапу різні варіанти виконання. Такі варіанти можуть відрізнятися наборами об'єктів і змінних, а також параметрами моделей. Аналіз впливу варіацій на оцінку ефективності повинен виконуватися в автоматизованому режимі (це має робити ядро програмного продукту).

3. Дотримання принципу «один етап – один метод». Всі варіанти конкретного етапу повинні виконуватися на основі одного і того ж методу.

4. Використання концепції сховища.

Репозиторій містить всю інформацію: опис об'єктів; опису змінних; опису структури системи; вихідні дані; опису тимчасових періодів. Пропонується така ієрархія рівнів репозиторію за ступенем деталізації: рівень «Дослідження»; рівень етапу «Дослідження»; рівень варіанта етапу «Дослідження». З погляду ступеня усуспільнення інформації повинен існувати:

– глобальний репозиторій (доступ до нього повинен бути відкритий для всіх користувачів, що виконують інші «Дослідження»);

– локальний репозиторій (доступний тільки для користувачів, які проводять конкретне «Дослідження»).

5. Розроблення мови опису сценаріїв роботи з СППР.

Така мова повинна дозволяти користувачеві описувати взаємозв'язки елементів системи в термінах теорії ефективності. У цій мові повинні бути передбачені відповідні типи даних і оператори. Користувач повинен мати можливість сформувати сценарій роботи відповідно до методики і зберігати його опис у базі даних.

Головною підсистемою, яка управляє роботою СППР, є ядро (диспетчер). Воно приймає запити від інтерфейсу користувача і перетворює їх у виклики процедур, що містяться в бібліотеці моделей і методів. Інтерфейсом між ядром і СУБД служить підсистема маніпулювання даними.

Модулі бібліотеки методів і моделей не повинні містити викликів SQL-запитів. Ядро формує символьні рядки команд для роботи з базою даних і переадресує їх для виконання в підсистему маніпулювання даними. Ця підсистема «знає», де знаходиться база даних: на локальній машині або на іншому сервері в локальній мережі.

Підсистема маніпулювання даними виконує команди і повідомляє ядру результат: виконано успішно або з помилкою. Результати запитів на вибірку даних підсистема маніпулювання даними передає ядру. Ядро готує дані для передачі їх функцій (процедур), які реалізують математичні методи. При цьому воно формує необхідні структури даних у пам'яті в тому вигляді, в якому потрібно для бібліотеки методів і моделей.

Ядро приймає результати виконання математичних процедур від бібліотеки методів і моделей та передає їх для візуалізації або формує рядки команд для вставки записів у таблиці бази даних. Ядро зчитує файли конфігурації і формує необхідні глобальні структури даних. Важливим питанням є вибір засобів програмної реалізації СППР.

Використовувані засоби повинні забезпечувати переносимість програмного продукту в різні операційні середовища: програмний продукт (звичайно, після перекомпіляції вихідних текстів) повинен працювати не тільки в середовищі операційної системи Windows, але також і в середовищі операційної системи UNIX (зокрема, Linux і FreeBSD). Виходячи з цього, бібліотека методів і моделей повинна бути написана на мові C, а інтерфейс користувача доцільно розробити на мові C++ з використанням багатоплатформної бібліотеки wxWidgets [4].

Відповідно до вищевикладених принципів і вимог пропонується архітектура СППР, представлена на рисунку.

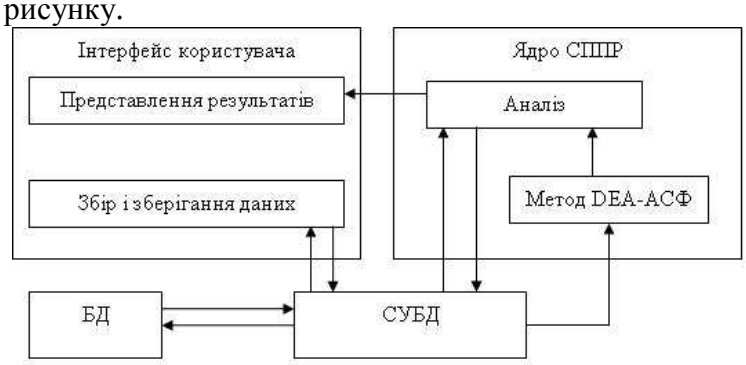


Рис. Архітектура СППР

Запропонована СППР складається з ряду взаємозв'язаних підсистем і модулів.

Підсистема «Збір і зберігання даних» включає:

– модуль ручного введення вихідних даних;

– модуль імпорту даних з інших джерел даних;

– модуль формування описів ієрархічних взаємозв'язків між підсистемами складної системи.

Підсистема «Аналіз» включає:

- модуль оцінки ефективності системи і підсистем;
- модуль прогнозування ефективності системи;
- модуль формування варіанта перерозподілу ресурсів.

Підсистема «Метод DEA–АСФ» включає:

- модуль вирішення моделей методу DEA–АСФ;
- модуль формування штучних еталонних границь ефективності.

Підсистема «Представлення результатів» включає:

– модуль представлення деталізованої інформації;
– модуль представлення агрегованої інформації.

Невід'ємним компонентом СППР є база даних, в якій зберігаються вихідні і результуючі дані, зібрані і сформовані у процесі використання СППР. Для управління базою даних необхідна СУБД.

Від СУБД залежить зручність виконання і надійність операцій маніпулювання даними. Як СУБД доцільно вибрати PostgreSQL. Ця система управління базами даних підтримує стандарт мови SQL, відрізняється високою надійністю і швидкодією. Важливим фактором під час вибору інструментальних програмних засобів є їх ціна. У цьому плані пропоновані програмні засоби мають перевагу: вони є безкоштовними і доступні у вихідних кодах.

Запропоновані архітектурні рішення дозволять створити СППР, яка матиме певні переваги порівняно з програмними продуктами, доступними нині. До головних переваг СППР слід віднести:

– можливість комплексного дослідження ефективності складної системи з урахуванням її структури;
– реалізація ідеї багатоваріантних досліджень з автоматизованим зіставленням отриманих результатів;
– організація зберігання й оброблення даних відповідно до теорії баз даних і з використанням професійної СУБД.

Описи атрибутів ряду основних таблиць бази даних представлено в таблиці.

Таблиця

Описи атрибутів ряду основних таблиць бази даних

Таблиця	Атрибути
1	2
Опис дослідження	- ідентифікатор складної ієрархічної системи; - найменування дослідження; - короткий опис дослідження; - дата проведення дослідження; - П.І.Б. відповідального за поведінку дослідження
Опис складових частин дослідження	- ідентифікатор складної ієрархічної системи; - код складової частини дослідження (стадії, етапи, підсистеми); - найменування складової частини дослідження; - короткий опис складової частини дослідження; - дата проведення складової частини дослідження; - П.І.Б. відповідального за поведінку складової частини дослідження
Репозиторій об'єктів	- унікальний ідентифікатор об'єкта; - найменування об'єкта
Репозиторій змінних системи	- унікальний ідентифікатор змінної; - найменування змінної
Ієрархії об'єктів системи	- унікальний ідентифікатор об'єкта; - унікальний ідентифікатор об'єкта-батька
Досліджувані об'єкти системи	- ідентифікатор складної ієрархічної системи; - код складової частини дослідження (стадії, етапи, підсистеми); - унікальний ідентифікатор об'єкта; - тип об'єкта (реальний або еталонний об'єкт)
Змінні, що описують досліджувані об'єкти системи	- ідентифікатор складної ієрархічної системи; - код складової частини дослідження (стадії, етапи, підсистеми); - унікальний ідентифікатор змінної; - тип змінної (вхідна або вихідна)

Закінчення табл.

1	2
Вихідні дані	- ідентифікатор складної ієрархічної системи; - код складової частини дослідження (стадії, етапи, підсистеми); - унікальний ідентифікатор об'єкта; - унікальний ідентифікатор змінної; - значення змінної; - номер часового періоду
Результати розрахунків	- код складної ієрархічної системи; - код складової частини дослідження (стадії, етапи, підсистеми); - унікальний ідентифікатор об'єкта; - унікальний ідентифікатор змінної; - код моделі методу DEA-АСФ; - початкове значення змінної; - рекомендоване значення змінної; - значення додаткової змінної

Оскільки в базі даних СППР повинні відображатися ієрархічні взаємозв'язки між об'єктами системи, то виникає питання про те, яким чином ці зв'язки уявити засобами традиційної реляційної СУБД.

Для вирішення цього завдання у структурі бази даних повинні бути створені спеціальні таблиці, що відображають всі ієрархічні зв'язки у предметній області. Зв'язки між об'єктами будуть встановлюватися за рахунок наявності в одній з таблиць поля «Об'єкт-батько». У цьому полі буде міститися ідентифікатор об'єкта, що є вищим стосовно об'єкта, представленого у поточному записі таблиці. Таким чином, формується структура даних, що нагадує дерево, а також однозв'язний список. Передбачені базові операції з цією структурою даних, такі як додавання нового об'єкта у структуру на будь-якому рівні ієрархії, видалення об'єкта з певного рівня ієрархії.

Під час видалення об'єкта, що має підлеглі об'єкти, можливі два варіанти: каскадне видалення всіх підлеглих об'єктів або перепідпорядкування цих об'єктів іншому об'єкту, що знаходиться на рівні ієрархії об'єкта, що видаляється або на вищому рівні ієрархії. Для реалізації подібних операцій використовуються так звані збережені процедури, які підтримуються всіма сучасними СУБД. Основне завдання, що покладається на базу даних, – формування масивів даних, необхідних для розрахунків і видача їх за запитом програмного модуля. На основі інформації про входи-виходи інформаційних систем проекту та підприємства в MS Excel засобами СУБД FOX PRO були побудовані необхідні таблиці баз даних.

Висновки. Розроблена архітектура СППР є інструментом створення системи підтримки прийняття рішень, реалізованої на основі сучасних інформаційних технологій, що дасть змогу організувати великі масиви даних та визначати показники ефективності інформаційних систем, а також ефективність інтегрованої інформаційної системи.

Список використаних джерел

1. *Скітер І. С.* Методика дослідження та моделювання динаміки двох економіко-інформаційних систем, які взаємодіють у просторі та часі / І. С. Скітер, М. В. Двоєглазова // Управління розвитком складних систем : зб. наукових праць. – К., 2011. – № 5. – С. 35-41.

2. *EffiVision* [Electronic resource]. – Access mode : http://www.dea-21.ru.

3. *KonSi-DEA* [Electronic resource]. – Access mode : http://www.data-envelopment-analysis.ru.

4. *Wxwidgets.* Cross platform GUI Library [Electronic resource]. – Access mode : http://www.wxwidgets.org.

УДК 004.7;004.942

Є.В. Риндич, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

АРХІТЕКТУРА ЗАХИЩЕНОЇ СИСТЕМИ ГОЛОСОВОГО КОНФЕРЕНЦ-ЗВ'ЯЗКУ В IP-МЕРЕЖАХ

Е.В. Рындич, канд. техн. наук
Черниговский государственній технологический університет, г. Чернигов, Украина

АРХИТЕКТУРА ЗАЩИЩЕННОЙ СИСТЕМЫ ГОЛОСОВОЙ КОНФЕРЕНЦ-СВЯЗИ В IP-СЕТЯХ

Y.V. Ryndych, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

ARCHITECTURE OF SECURED VOICE CONFERENCE SYSTEMS IN IP-NETWORKS

Досліджено існуючі системи конференц-зв'язку. Визначено загальні риси захищених конференц-систем та їх функціональність. Запропоновано загальну архітектуру захищеної системи голосового конференц-зв'язку в IP-мережах. Визначено певні особливості побудови систем голосового конференц-зв'язку, пов'язані з обробленням інформації на стороні сервера.

***Ключові слова**: клієнт-серверна архітектура, інформаційна система, конференц-зв'язок, конфіденційність, мікшування голосових даних.*

Исследовано существующие системы конференц-связи. Определено общие черты защищенных конференц-систем и их функциональность. Предложена общая архитектура защищенной системы конференц-связи в IP-сетях. Определены некоторые особенности построения систем голосовой конференц-связи, связанные с обработкой информации на стороне сервера.

***Ключевые слова**: клиент-серверная архитектура, информационная система, конференц-связь, конфиденциальность, микширование голосовых данных.*

Studied existing conference. Defined similarities and functionality of protected conference systems. The general architecture of a secure conferencing systems in IP-networks proposed. Identified several design features of voice conferencing related to information processing on the server side.

***Key words**: client-server architecture, informative system, conferencing, confidentiality, mixing voice.*

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку конференц-систем та їх висока гетерогенність вимагають від мережевого обладнання чіткої взаємодії та можливості в реальному часі гарантувати якісну передачу даних з одного сегмента мережі в інший. Одним із найперспективніших на сьогодні напрямів у розвитку конференц-систем є розроблення захищених корпоративних конференц-систем на базі протоколу IP, які дозволяють створювати голосові конференції з дотриманням вимог конфіденційності інформації, що передається.

Проте питання побудови захищених систем голосового конференц-зв'язку в IP-мережах, розрахованих на значну кількість учасників переговорів, та підтримки всіх притаманних їм властивостей освітлені недостатньо і потребують подальшого дослідження. Під час передачі стиснених мовних сигналів IP-мережами повною мірою не відпрацьовуються ефективні механізми забезпечення обмеженого доступу. Досі не визначені загальні принципи архітектурної побудови та підходи до моделювання корпоративних конференц-систем на базі протоколу IP, які б дозволяли створювати нові системи й аналізувати використання в існуючих системах додаткових елементів забезпечення конфіденційності комерційної інформації, що циркулює в системі.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача розроблення архітектури систем голосового конференц-зв'язку в IP-мережах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем характеризується переходом до інтегрованої передачі даних і мовлення. Це забезпечується за допомогою систем конференц-зв'язку, які дозволяють у режимі реального часу обмінюватися інформацією, проводити голосування, відео або голосові переговори в режимі, коли співрозмовники можуть говорити й слухати одночасно, а кількість

абонентів більше або дорівнює трьом. Для більшості конференц-систем характерно вільне розповсюдження інформації, коли вона є відкритою [1].

Особливо це стосується веб-конференцій, які будуються на основі IP-протоколу. Саме ці інформаційні системи дозволяють у процесі свого функціонування проводити онлайн-презентації, спільно працювати з документами і додатками, синхронно переглядати сайти, відеофайли і зображення в режимі, коли учасники територіально віддалені та знаходяться на своєму робочому місці за комп'ютером.

Як правило, веб-конференції для передачі даних використовують глобальну IP-мережу – Інтернет [2]. Однак у таких системах не виконуються умови конфіденційності режиму спілкування та передачі даних, які характерні для корпоративних систем. Тому актуальною є задача щодо розроблення конференц-системи, орієнтованої на корпоративне використання.

Конференц-системи відносяться до класу корпоративних інформаційних систем (КІС), основними властивостями яких є:

1. Попередження несанкціонованого доступу.
2. Наявність засобів супроводження та адаптації.
3. Авторизація інформації.
4. Реєстрація операцій з інформацією.
5. Консолідація інформації на рівні підприємств, філіалів, дочірніх компаній.

Існуючі конференц-системи, як правило, не задовольняють ці вимоги повною мірою.

Так, конференц-система Bosch DCN NG, хоча і є найбільш розповсюдженою, але не може бути віднесена до класу ККС. Така система призначена, перш за все, для створення локального конференц-залу та забезпечує:

1. Автоматичне керування ходом конференції в обраному режимі роботи.
2. Можливість вимикати активні мікрофони.
3. Реєстрація учасників за допомогою карток ідентифікації.
4. Голосування.
5. Синхронний переклад виступаючого.
6. Автоматичне наведення відеокамер на того, хто виступає.

Напрямком розвитку цієї системи є автоматизація проведення локальної конференції, а саме включення до цієї системи функцій керування побутовими пристроями та освітленням [3]. Використання цієї системи як розподіленої або територіально рознесеної системи не можливе. До того ж вона використовує аналогові канали передачі даних.

Інша конференц-система – Brahler Digimix – використовує цифрову кабельну та безпровідну технологію передачі даних, а для проведення голосування додатково використовується інша система Brahler Digivote III. Голосування проводиться зі спеціальних пультів, які з'єднуються з сервером за допомогою безпровідних каналів зв'язку. Об'єднання системи Brahler Digimix та Brahler Digivote III дозволяє створити ККС. Однак виробник не пропонує жодних варіантів створення розподіленої ККС, в якій буде циркулювати комерційна інформація. Така система розгортається в межах одного підприємства [4].

Конференц-система DNCA (Data Naught Conference Appliance) підтримує створення відкритих голосових конференцій у мережі Інтернет.

Загальна порівняльна характеристика розглянутих вище конференц-систем наведена в табл.

Слід зазначити, що незважаючи на деякі відмінності, їм притаманні такі загальні риси: модульність, наявність центрального елемента, ідентифікація користувачів під час проведення голосування.

Мета статті. Провести аналіз та виділити особливості побудови захищеної системи голосового конференц-зв'язку в IP-мережах. Запропонувати узагальнену архітектуру цього класу систем з урахуванням їх особливостей.

Таблиця

Загальна порівняльна характеристика конференц-систем

Назва системи	Режим багатопоточної конференції	Режим «один до одного»	Модерація та адміністрування	Використання глобальних мереж	Ідентифікація	Автентифікація	Передача даних	Голосування	Архівація	Управління користувачами
Bosch DCN NG	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+
Digimix Brahler	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+
DNCA	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+

Основна частина. Для створення конференц-зв'язку на основі протоколу IP можна використовувати «клієнт-серверну» архітектуру або архітектуру «кожний з кожним» [5-8]. При цьому найбільш важливими є необхідність проведення мікшування голосових потоків, отриманих від декількох клієнтів, та отримання інформації про кількість інформаційних потоків, які створюються між клієнтами й передаються мережею. Залежність кількості інформаційних потоків для архітектури «клієнт–сервер» виражена формулою (1), а залежність для архітектури «кожний з кожним» – формулою (2), де n – це кількість абонентів у конференції.

$$k = 2 * n, \tag{1}$$

$$k = 2 * n * (n - 1). \tag{2}$$

Існуючі протоколи конференц-зв'язку, хоча і підтримують створення конференцій, але розраховані на передачу голосових або відеоданих між двома абонентами. Прикладом такого протоколу є протокол SIP. Саме тому доцільно використовувати архітектуру «клієнт-сервер» (рис. 1).

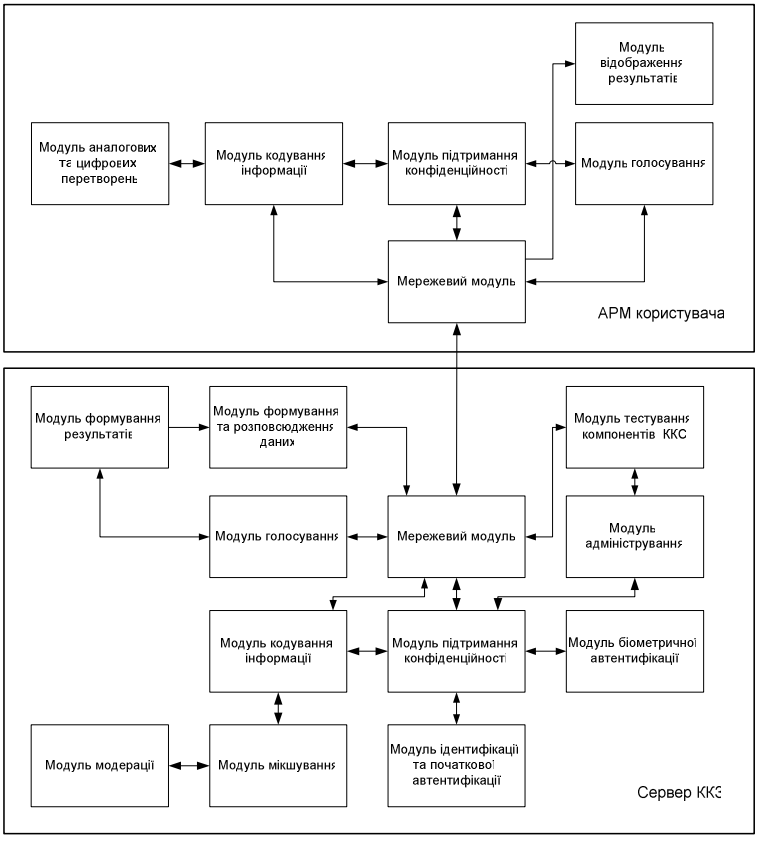


Рис. 1. Архітектура сервера та клієнта захищеної системи голосовогои конференц-зв'язку

Під час реалізації модуля мікшування були виявлені такі особливості: програмне збільшення гучності на стороні клієнта, вплив зовнішніх завад, реалізація зведення декількох голосових потоків.

Зведення виконується на стороні сервера за допомогою мікшера. Його структура зображена на рис. 2.

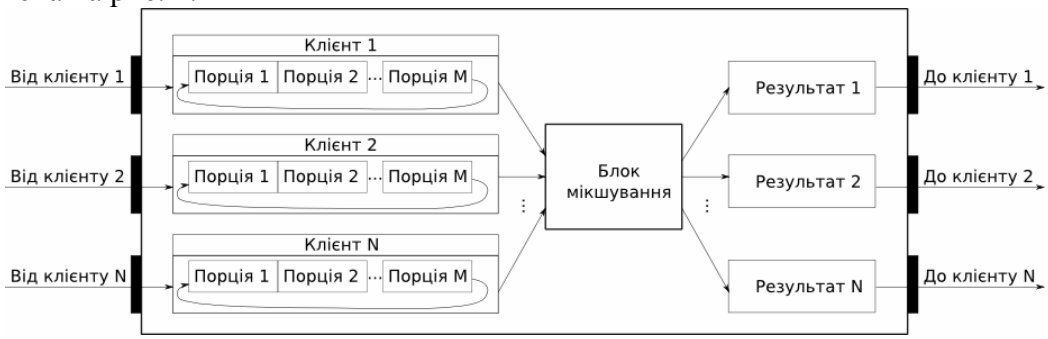


Рис. 2. Структурна схема мікшера

Для кожного клієнта мікшер містить індивідуальний кільцевий буфер, до якого надходять дані з попереднього елемента. Розмір кожного буфера фіксований і має однакове значення для всіх клієнтів. Під час записування даних у буфер, дані, що знаходяться в кінці буфера, перезаписуються. Оскільки використовується кільцевий буфер, то здається, що дані безрезультатно втрачаються, але це не відповідає дійсності. Цьому є логічне пояснення, а саме: оскільки система працює в режимі реального часу, то актуальні дані, тобто ті, що надійшли найпізніше, мають найвищий пріоритет. Через це система має право на перезапис даних, які втратили свою актуальність.

Під час зведення з кожного буфера виймається одна порція даних. Якщо буфер порожній, то вважається, що була отримана порція з порожніми даними.

Власне зведення відбувається у блоці мікшування.

Зведення відбувається через рівні проміжки часу. Для усунення ефекту акустичного еха початкові дані, отримані з кільцевого буфера, не беруть участі у зведенні, результат якого буде відправлено до цього ж самого клієнта. Структурна схема зведення партії порцій даних представлена нижче на рис. 3.

Рис. 3. Структурна схема алгоритму мікшування для одного клієнта

Рисунок 3 відображає тільки частину алгоритму, а саме для клієнта 1. Для усіх інших клієнтів схема така сама і має тільки одне вищеназване зауваження: у формуванні результату зведення для клієнта дані від самого клієнта не враховуються.

Як власне алгоритм була використана адаптована версія [9] алгоритму Віктора Тота, який він описує у своїй статті [10]. Використаний алгоритм дозволяє уникнути виникнення дисторшну – звукового ефекту, що виникає при жорсткому обмеженні амплітуд. Така ситуація виникає під час зведення звукових рівнів, коли як алгоритм зведення використовується арифметична операція додавання, а отримуваний результат має більше значення, ніж максимально можливе (рис. 4). При цьому результату надається це саме найбільш можливе значення (рис. 5).

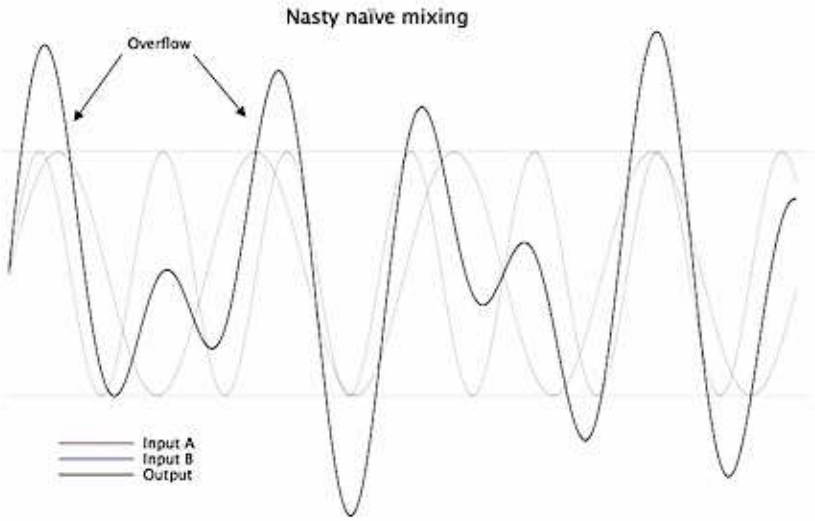


Рис. 4. Ілюстрація переповнення (overflow) результату зведення

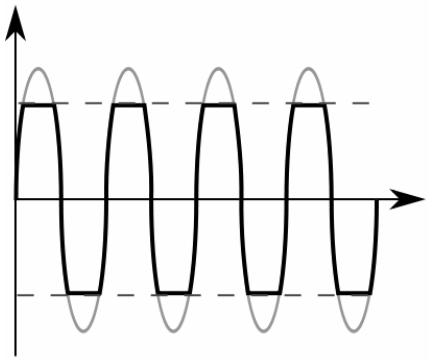


Рис. 5. Звуковий ефект "дисторшн", а саме його частковий випадок – "кліппінг"

Для усунення дисторшн ефекту замість звичайного арифметичного додавання використовується параметризоване арифметичне додавання.

Висновки. У роботі проведено аналіз існуючих конференц-систем, який показав необхідність розширення функціональності та розроблення узагальненої архітектури ККС. Виділені основні компоненти системи та наведена архітектура компонентів.

Як видно з опису мікшера, вузьким місцем усієї системи є алгоритм підготовки даних для зведення. Проблема полягає в тому, що мікшер виконує зведення через рівні проміжки часу. При цьому дані, які повинні брати участь у процесі зведення, можуть потрапляти через мережу на сервер у довільні моменти часу. Складність усієї задачі полягає в необхідності гарантування потрапляння порцій даних, які виникли в один момент часу, до мікшера з мінімальною різницею у часі, для того, щоб вони мали змогу взяти участь в одному і тому ж циклі зведення. Вирішення цієї складної проблеми надасть поштовх для значного прискорення розвитку всієї системи.

Список використаних джерел

1. *Конференц-система* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/.

2. *Зарубин А.* Системы конференц-связи для совместной работы / А. Зарубин, Е. Коптилина // Connect! Мир связи. – 2008. – № 11. – С. 25-27.

3. *Bosch* DCN NG - Оборудование для аудиоконференций [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.confsystems.ru/aconf/catalog/1161765982.

4. *Digimic-Concept* [Electronic resource]. – Access mode : http://www.braehler.su/en/konferenztechnik/digimic/index5a0a.html.

5. *Хелд Г.* Сокращение задержки голоса по IP [Электронный ресурс] / Г. Хелд // LAN. – 2000. – № 7. – Режим доступа : http://www.osp.ru.

6. *Измерение* джиттера в цифровых системах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://citforum.ru/nets/hard/jitter/.

7. *Данн Дж.* Джиттер. Теория. Ч. 3 [Электронный ресурс] / Дж. Данн. – Режим доступа : http://www.ixbt.com/proaudio/jitter-theory-part3.shtml.

8. *Ethereal* [Electronic resource]. – Access mode : http://ethereal.com.

9. *A quick-and-dirty* audio sample mixing technique to avoid clipping [Electronic resource]. – Access mode : atastypixel.com/blog/how-to-mix-audio-samples-properly-on-ios.

10. *Mixing* digital audio [Electronic resource]. – Access mode : www.vttoth.com/CMS/index.php/technical-notes/68.

УДК 681.5(042.3)

В.В. Семко, канд. техн. наук
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ЛОГІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПИСУ ПРОСТОРУ РІШЕНЬ

В.В. Семко, канд. техн. наук
Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, г. Киев, Украина

ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ПРОСТРАНСТВА РЕШЕНИЙ

V.V. Semko, Candidate of Technical Sciences
Institute of Telecommunications and Global Information Space in the system of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

LOGICAL-MATHEMATICAL MODEL OF THE DESCRIPTION OF DECISIONS SPACE

Розглянуто питання розрахунку підпростору рішень простору спостережень при синтезі гарантованих управлінь у топологічному просторі пошуку. Запропоновано логіко-математичну модель опису підпростору рішень для пошукової системи.

***Ключові слова**: простір спостережень, простір рішень, пошукова система, об'єкт пошуку, топологічний простір.*

Рассмотрены вопросы расчета подпространства решений пространства наблюдений при синтезе гарантированных управлений в топологическом пространстве поиска. Предложена логико-математическая модель описания пространства решений для поисковой системы.

***Ключевые слова:** пространство наблюдений, пространство решений, объект поиска, топологическое пространство.*

The paper presents questions of calculation of decision of space of supervisions subspace are in-process considered at the synthesis of the assured managements in topological space of search. The logical-mathematical model of the description of decision space is offered for the searching system.

***Key words:** space of supervision, space of decisions, object of search, topological space.*

Постановка проблеми. Принциповою відмінністю задач пошуку є те, що при їх вирішенні використовується поточна інформація. Якщо така інформація надходить у дискретні моменти часу з великими інтервалами, синтез алгоритмів пошуку та переслідування зазвичай здійснюється з використанням методів теорії пошуку.

У разі використання методів теорії пошуку традиційно застосовуються ігрові методи. Використання теоретико-автоматних методів під час створення систем синтезу та прийняття рішень дозволяє створити новітні алгоритми пошуку та переслідування.

При цьому великий інтерес є під час застосування теоретико-автоматних методів у разі створення систем синтезу та прийняття рішень.

Під час створення сучасних автоматизованих засобів і систем управління виходять з положень теорії перетворення інформації (загальної теорії алгоритмів, абстрактної теорії автоматів) та теорії побудови різного роду перетворювачів інформації (елементи математичної логіки, абстрактна та структурна теорія автоматів).

Вирішення задач пошуку і переслідування у просторі спостережень та просторі станів є актуальними задачами штучного інтелекту. Розроблення та дослідження новітніх підходів до вирішення задач щодо створення систем синтезу рішень для автоматичних та автоматизованих (ергатичних) систем управління у фізичному та віртуальному (кібернетичному) просторі дозволяє перейти від ігрових до мінімально перебірних процедур синтезу рішень як багатокрокових процесів.

Під час вирішення задач пошуку і переслідування у просторі спостережень та просторі станів застосуємо цифровий автомат як пристрій або програмний засіб перетворення інформації.

Аналіз досліджень і публікацій. На відміну від ігрових методів вирішення задач пошуку та переслідування [1; 2] Д.О. Поспєловим та його послідовниками була запропонована теорія ситуаційного управління складними об'єктами [3; 4].

Для здійснення мети управління об'єктом, який є спроможним до автономної роботи та на тактичному рівні об'єднує об'єкт та суб'єкт управління (ергамат), необхідно здійснити формальний опис інформаційної множини гарантованих управлінь ергаматом під час синтезу рішень щодо управління його переміщенням у просторі пошуку (спостереження) [5; 6]. Тобто синтезовані рішення щодо управління ергаматом мають обиратись тільки у множині його гарантованих управлінь за деяким принципом оптимальності та правилом останову процедури перебору.

Отже, задача синтезу гарантованих управлінь ергаматом в умовах невизначеності є актуальною і має не тільки теоретичне, але і велике прикладне значення для вирішення задач конфлікту взаємодії об'єктів та суб'єктів у фізичному та віртуальному просторі.

Слід зазначити, що в такому випадку управління з боку людини-оператора переходить з рівня управління окремими рухами на більш високий рівень постановки завдань та вказівки цілей для ергамату.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є розроблення моделі синтезу ситуаційного управління ергаматом в умовах невизначеності.

Виклад основного матеріалу. Постановка та вирішення задачі пошуку істотно залежить від того, яку інформацію має пошукова система (ПС) та об'єкт пошуку (ОП) [5].

Для моделі ПС [6]

$$M^0 = \langle Б^0, F^0, \Gamma^0_{пр} \rangle, \quad (1)$$

де $Б^0$ – базис; F^0 – співвідношення, яке враховує кінематичні співвідношення щодо руху ПС; $\Gamma^0_{пр}$ – граматика та правила утворення співвідношень при взаємодії ПС та ОП.

$$Б^0 = (X^0, Y^0, A^0), \quad (2)$$

де X^0 – характеристичний вектор стану ПС; Y^0 – множина описів усіх ОП у просторі спостереження Q, яка вміщує дані про згладжені ОП, похідних від координат відповідно до припущень A^0, яке враховує прогноз і динаміку переміщення всіх ОП.

Співвідношення

$$F^0(f^0_x, f^0_c, d^0) \quad (3)$$

вміщує згладжені координати ПС у просторі спостереження QЄ вироджені в точку початку координат, зв'язаної з ПС системи координат, f^0_c – згладжені значення вектора швидкості (першої похідної) ПС у просторі спостереження Q, d^0 – припустиме значення дистанції зближення ПС з ОП у просторі спостереження Q.

Слід зауважити, що значення d^i визначається вимогами безпеки взаємодії об'єктів у просторі спостереження Q та невизначеністю переміщення ОП.

Введемо для *i*-го ОП співвідношення, яке описує його властивості

$$F^i\left(f_x^i, f_c^i, d^i\right), \tag{4}$$

де f_x^i – згладжені координати *i*-го ОП у просторі спостереження Q, f_c^i – згладжені значення вектора швидкості (першої похідної) *i*-го ОП у просторі спостереження Q, d^i – припустиме значення дистанції зближення ОУ з *i*-м ОП у просторі спостереження Q.

У такому разі маємо формальну мову опису управлінь ПС, яка є безліччю ланцюжків у деякому кінцевому алфавіті. За моделлю (1) кінцевим алфавітом для ПС є співвідношення (3).

Наявність граматики $\Gamma_{пр}^0$ вказує на кінцевий механізм завдання мови, яка описує ланцюжки управління ПС. У загальному випадку ланцюжки управління є нескінченною множиною. Слід зауважити, що нескінченні об'єкти важко задати, наприклад, простим перерахуванням елементів.

Формальна мова є безліччю ланцюжків у деякому кінцевому алфавіті. За моделлю (1) кінцевим алфавітом є співвідношення (3).

ПС є керованою ергатичною системою в просторі спостереження Q.

Визначимо регулярну граматику $\Gamma_{пр}^0$ пошукової системи

$$\Gamma_{пр}^0 = (F^0, T^0, P^0, C^0 \subset Q), \tag{5}$$

де F^0 – множина нетермінальних позицій, T^0 – множина термінальних (кінцевих) позицій, P^0 – кінцева множина правил (продукцій), яка вміщує хоча б одну нетермінальну позицію, C^0 – початкова нетермінальна позиція ПС.

Тоді для переміщення ПС у базисі, визначеному співвідношенням (2), можна задати *n* ланцюжків $U_{j_k}^0$, які характеризуються переміщенням відображаючої точки ПС у просторі Q $(X_{j_k}^0 \subset Q)$ та обраними значеннями характеристик переміщення $Y_{j_k}^0$, які визначаються динамічними та фізичними обмеженнями щодо можливих управлінь ПС.

Тобто

$$\begin{cases} Y_{j_k}^0 \subset Y_{j_o}^0 \\ f_{c_{j_k}}^0 \subset Y_j^0 \\ f_{x_{j_k}}^0 \subset X_j^0. \end{cases} \tag{6}$$

Тим самим стратегія переміщення ПС є конкатенацією ланцюжків, кількість яких обумовлена динамічними характеристиками ОУ, обмеженнями простору спостереження, динамічними характеристиками спостережуваних ОП, обмеженнями політики безпеки для інформаційних об'єктів та суб'єктів, а також іншими вимогами, які є обов'язковими для всіх об'єктів у просторі спостережень.

Формально граматика $\Gamma_{пр}^0$ є породжуючою і використовується для побудови "правильних" ланцюжків. Послідовність правил P^0 у процесі породження ланцюжка $U_{j_k}^0$ є його синтезом

$$U_j^0 = \bigcup_{k=1}^{n} U_{j_k}^0 . \tag{7}$$

Критерій відбору під час розрахунку і конкатенації ланцюжків U_j^0 може входити до правил P^0 ПС.

При наявності формального опису інформаційної множини гарантованих управлінь ПС при синтезі рішень (ланцюжків) перебірна процедура синтезу рішень перетворюється в мінімально перебірну задачу динамічного програмування за критерієм мінімізації втрат ресурсів.

Нехай базис має вигляд

$$Б^0 = \{b_1^0, \dots, b_r^0\}, \quad (8)$$

де b_i^0 - l-та підмножина алфавіту, яка не є пустою.

Позначимо ланцюжок

$$V_{jk}^0 = U_{jk}^0 \circ U_{jk+z}^0, \quad (9)$$

де $\circ$ – операція конкатенації символів (базової складової мови).

Тоді множина V_{jk}^0 є формальною мовою, яка визначена на алфавіті $Б^0$.

Мову V_j^0 засновано на системі обмежень, які накладаються на систему напіввідношень (продукції) Туе, а граматика $Г_{пр}^0$ визначена як механізм породження ланцюжків U_{jk}^0.

Визначення формальної граматики $Г_{пр}^0$ вимагає наявності ще одного алфавіту

$$V^0 = \bigcup_{m=1}^{N} V_m^0. \quad (10)$$

Під час вирішення практичних задач для технічних або ергатичних систем управління алфавітний спосіб завдання інформації при синтезі рішень з урахуванням системи напіввідношень є достатньо зручним та універсальним, а ПС виконує функції перетворення інформації.

Припустимо, що є деяке явище α_j з деякого класу явищ U_j^0, яке приводить до появи деякого визначеного явища β_j з класу явищ U_j^0. У такому разі маємо перетворення інформації

$$\alpha_j \to \beta_j = \varphi_j(U_j^0). \quad (11)$$

Тобто здійснюється відображення явища α_j в явище β_j певним об’єктом (ПС), який є перетворювачем інформації.

Перетворення φ_j є детермінованим та однозначним. У цьому разі вихідна інформація повністю визначає похідну. При цьому еквівалентність перетворення φ_j не є обов’язковою, тобто

$$\varphi_j \subset \varnothing. \quad (12)$$

У такому разі синтез ланцюжків U_j^0 є перетворенням похідної інформації з використанням двійкового кодування, а синтез ланцюжків V_j^0 є результатом функціонування детермінованого кінцевого автомата, який у загальному вигляді є п’ятіркою

$$V^0 = (Б^0, S^0, U^0, F^0, C^0 \subset Q), \quad (13)$$

де $Б^0$ – базис, в якому формально описано стан ПС (алфавіт), S^0 – алфавіт стану автомата, U^0 – функція переходів для ОУ, F^0 – початковий стан автомату, $C^0 \subset Q$ – множина кінцевих станів автомата.

Функція переходів U^0 є множиною кінцевих точок станів кінцевого автомату, яким є ОУ при його переміщенні у просторі Q.

Під час вирішення задачі пошуку було сформовано простір Q, в якому ОУ має ознаку приналежності T_0.

Визначимо алфавіт S^0 у вигляді

$$S^0 = Q \cap (\bigcup_{N,\psi^0} S^i(Б^0, Б^i, F^0, F^i, t)), \quad (14)$$

де t – час, N – кількість ОП, ψ^0 – припустимі для ПС напрямки переміщення у просторі спостереження Q.

Фактично $S^i(Б^0, Б^i, F^0, F^i, t)$ є автоматним відображенням підмножини станів *i*-го ОП на множину $\mathbf{Q}$. Тобто S^0 є множиною автоматного відображення, яке задовольняє умови повноти для ПС.

Множина ψ^0 визначає просторове автоматне відображення S^i у множину $\mathbf{Q}$, включаючи пусті відображення ε.

Синтез ланцюжків для ПС здійснюється в просторі S^0, який фактично є простором рішень. Синтезовані ланцюжки можуть бути побудовані тільки у просторі гарантованого існування управлінь ПС, що реалізуються під час вирішення задачі ціледосяжності $C^0 \subset \mathbf{Q}$.

Під час врахування $\Gamma^0_{пр}$ ланцюжки V^0_j визначаються за будь-яким методом пошуку (евристичним або з використанням нейронних мереж) за певним критерієм відбору λ та правилом зупинки.

Тим самим задача синтезу ланцюжків перестає бути ігровою, пошук відображення похідного алфавіту стає мінімально переборною процедурою в просторі рішень S^0 для ПС.

Надалі будемо мати на увазі, що використовується пов’язана система координат, центр якої розміщено в точковому об’єкті, а вісь ординат збігається з будівельною віссю ПС. ОП у подальшому також є точковим об’єктом.

Пошук має місце щодо об’єктів, множина положень (станів) яких утворює деяку кінцеву або нескінчену область на площині або в просторі пошуку.

Для спрощення розглянемо алгоритм розрахунку інформаційного образу рішень при синтезі ланцюжків за алфавітом S^0 згідно з виразом (14) для двомірного простору спостереження $\mathbf{Q}$.

Розглянемо спосіб побудови (розрахунку) простору рішень для комбінованого керування (ПРКК) ПС за напрямком та швидкістю.

При розрахунку ПРКК здійснимо декомпозицію, задачу на два рівні: обчислення множин (діапазонів) припустимих швидкостей при обраному (заданому) напрямку переміщення ПС у просторі $\mathbf{Q}$, об’єднання множин припустимих швидкостей на множині обраних (припустимих) напрямків переміщення ПС.

Під час здійснення розрахунків введемо значення часу затримки τ. Значення τ враховує час виконання обчислювальних процедур, прийняття рішення щодо обраного напрямку руху та швидкості в діапазоні припустимих швидкостей ПС $V^i = [V^i_{min}, V^i_{max}]$. Координати *i*-го ОП $A_i = (x^i_a, y^i_a)$ визначені у пов’язаній з ПС системі декартових координат для випадку відносного руху (рис.). Визначимо координати вектора істинної швидкості *i*-го ОП $\overrightarrow{V^j_{H2}} = (x^i_c, y^i_c)$ у режимі істинного руху.

Формально ПРКК можна визначити

$$\varkappa = \{\cup_\gamma V^i_\gamma\} \forall V^i_\gamma \subset V_e, \forall i \subset \kappa, \tag{15}$$

де $\varkappa$ – ПРКК, γ – множина напрямків переміщення, V^i_γ – множина припустимих швидкостей переміщення для *i*-го ОП за напрямком з множини γ, κ – кількість ОП на час спостереження.

Згідно з (15) ПРКК буде являти собою множину, утворену як перетин множин припустимих швидкостей переміщення ПС стосовно *i*-го ОП за напрямками припустимого переміщення ПС.

Тим самим ПРКК буде являти собою об'єднання за напрямками переміщення окремих діапазонів (множин) припустимих швидкостей ПС відносно всіх ОП (лінійка швидкостей) на поточний момент часу.

З геометричної інтерпретації способу визначення ПРКК отримаємо евристичне вирішуване правило у вигляді предикативної структури.

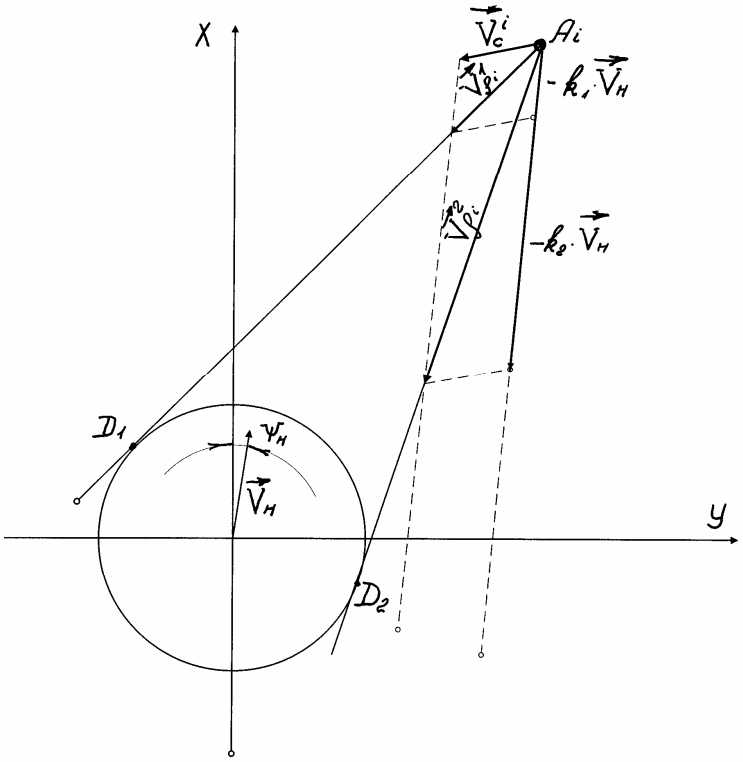


Рис. Геометрична інтерпретація способу розрахунку лінійки швидкостей

Побудуємо в ортогональному базисі з початку координат, як із центра, коло радіуса $d_{пр}^i$, який дорівнює припустимій дистанції зближення ПС з *i*-м ОП. Відобразимо точкою згладжені координати *i*-го ОП. Проведемо з точки A^i дотичні (D_1A_i) та (D_2A_i) до побудованого кола, які за своїм геометричним змістом є гранично припустимими лініями відносного руху (переміщення) ЛВР1 та ЛВР2 відповідно і забезпечують розходження з *i*-м ОП на відстані, яка не є меншою від $d_{пр}^i$.

З початку координат будуємо вектор істинної швидкості ПС.

З точки A_i будуємо вектор власної швидкості *i*-го ОП. Через точку A_i проводимо лінію, яка є паралельною до вектора $\vec{V}_н$. У точці будуємо трикутник швидкості для отримання вектора відносної швидкості, спрямованого по ЛВР1 та ЛВР2, змінивши величину, а при необхідності і напрямок вектора $\vec{V}_н$ на протилежний. Таким чином, отримуємо значення множників при векторі $\vec{V}_н$, які задовольняють умови

$$\begin{cases}\left(\vec{V}_c^i - n_1\vec{V}_н\right)\cdot\overrightarrow{A_iD_1} = 0\\ \left(\vec{V}_c^i - n_2\vec{V}_н\right)\cdot\overrightarrow{A_iD_2} = 0\end{cases}, \qquad (16)$$

де n_1 та n_2 – коефіцієнти, які визначають зміну величини вектора $\vec{V}_н$ для побудови вектора відносної швидкості $\vec{V}_{\rho_i}^1$ та $\vec{V}_{\rho_i}^2$, які відповідно забезпечують переміщення вздовж ліній ЛВР1 та ЛВР2. Тобто

$$\begin{cases} \overrightarrow{V_{\rho_i}^1} = \overrightarrow{V_c^i} - n_1\overrightarrow{V_н} \\ \overrightarrow{V_{\rho_i}^2} = \overrightarrow{V_c^i} - n_2\overrightarrow{V_н} \end{cases}. \quad (17)$$

З виразу (16) знайдемо співвідношення для обчислення n_1 та n_2.

$$\begin{cases} n_1 = \frac{\overrightarrow{A_iD_2}\cdot\overrightarrow{V_c^i}}{\overrightarrow{A_iD_2}\cdot\overrightarrow{V_н}} \\ n_2 = \frac{\overrightarrow{A_iD_2}\cdot\overrightarrow{V_c^i}}{\overrightarrow{A_iD_2}\cdot\overrightarrow{V_н}} \end{cases}. \quad (18)$$

Аналіз практичних можливостей отримання вектора відносної швидкості переміщення *i*-го ОП вздовж ліній ЛВР1 та ЛВР2 дозволяє зробити висновок про те, що в окремих випадках співпадання векторів $\overrightarrow{A_iD_1}$ та $\overrightarrow{A_iD_2}$ з векторами $\overrightarrow{V_{\rho_i}^1}$ та $\overrightarrow{V_{\rho_i}^2}$ може бути по два вектори $\overrightarrow{V_{\rho_i}^1}$ та $\overrightarrow{V_{\rho_i}^2}$ відповідно для кожної лінії відносного руху, що є характерним для випадків зближення та переслідування. Тобто маємо дві множини

$$\begin{cases} n_1 = \{\mathrm{n}_1^1, \mathrm{n}_1^2\} \\ n_2 = \{\mathrm{n}_2^1, \mathrm{n}_2^2\} \end{cases}. \quad (19)$$

Відповідно до значень величин у співвідношеннях

$$\begin{cases} \overrightarrow{V_{н_1}^J} = \mathrm{n}_1^j\overrightarrow{V_н} \\ \overrightarrow{V_{н_2}^J} = \mathrm{n}_2^j\overrightarrow{V_н} \end{cases}, \quad (20)$$

$$\begin{cases} k_1^j = \mathrm{Sign}\left(\overrightarrow{A_iD_1}\cdot\overrightarrow{V_{\rho_i}^1}\right) \\ k_2^j = \mathrm{Sign}\left(\overrightarrow{A_iD_1}\cdot\overrightarrow{V_{\rho_i}^2}\right) \end{cases}, \quad (21)$$

і значенням найбільшої можливої швидкості V_{max} та співвідношеннями між знаками множин k_i і n_i визначено евристичне вирішаюче правило формування інтервалів безпечних швидкостей V_e^i для ПС.

Евристичне вирішуюче правило формування інтервалів безпечних швидкостей для ПС визначається набором предикатів, кожен з яких надає однозначну відповідь про припустимі швидкості V_e^i =[0 , V_{max}].

$$\left\{\left(n_1^j>0\right)\wedge\left(k_1^j>0\right)\wedge\left(n_2^j>0\right)\wedge\left(k_2^j>0\right)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\right\}\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|<V_{\max}\right)\rightarrow$$
$$\left\langle V\in\left\{\left[0,\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right]\cup\left[\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|,V_{\max}\right]\right\}\right\rangle, \quad (22)$$

$$\left\{\left(n_1^j>0\right)\wedge\left(k_1^j>0\right)\wedge\left(n_2^j>0\right)\wedge\left(k_2^j>0\right)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\geq\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<V_{\max}\right)\right\}\rightarrow$$
$$\left\langle V\in\left\{\left[0,\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right]\cup\left[\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|,V_{\max}\right]\right\}\right\rangle, \quad (23)$$

$$\left\{\left(n_1^j>0\right)\wedge\left(k_1^j>0\right)\wedge\left(n_2^j>0\right)\wedge\left(k_2^j>0\right)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\right\}\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\geq V_{\max}\right)\rightarrow$$
$$\left\langle V\in[0,V_{\max}]\right\rangle, \quad (24)$$

$$\left\{\left(n_1^j>0\right)\wedge\left(k_1^j>0\right)\wedge\left(n_2^j>0\right)\wedge\left(k_2^j>0\right)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\right\}\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|>V_{\max}\right)\rightarrow$$
$$\left\langle V\in[0,V_{\max}]\right\rangle, \quad (25)$$

$$\left\{\left(n_1^j>0\right)\wedge\left(k_1^j>0\right)\wedge\left(n_2^j>0\right)\wedge\left(k_2^j>0\right)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\geq\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<V_{\max}<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right\}\rightarrow\right.$$
$$\left.\left\langle V\in\left\{\left[0,\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right]\cup\left[\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|,V_{\max}\right]\right\}\right\rangle\right\}, \quad (26)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(k_1^j>0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_2^j>0)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right)\wedge\overline{\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|<V_{max}<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)}\rightarrow$$
$$\langle V\in\left\{\left[0,\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right]\cup\left[\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|,V_{max}\right]\right\rangle\}, \quad (27)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j>0)\wedge(k_2^j\leq 0)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|>\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right)\wedge\overline{\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|<V_{max}\right)}\}\rightarrow$$
$$\{V\in\left[\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|,V_{max}\right]\} \quad (28)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j\leq 0)\wedge(k_2^j>0)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|>\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\wedge\overline{\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<V_{max}\right)}\}\rightarrow$$
$$\{V\in\left[\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|,V_{max}\right]\}, \quad (29)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j>0)\wedge(k_2^j\leq 0)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|>\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\wedge\overline{\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|>V_{max}\right)}\}\rightarrow$$
$$\{V\in\emptyset\}, \quad (30)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j\leq 0)\wedge(k_2^j<0)]\wedge[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j\leq 0)\wedge$$
$$(k_2^j\leq 0)]\wedge[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j\leq 0)\wedge(k_2^j<0)]\wedge[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j>0)\wedge$$
$$(k_2^j<0)]\wedge[(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j<0)\wedge(k_2^j>0)]\}\rightarrow\{V\in\emptyset\}, \quad (31)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j\geq 0)\wedge(k_2^j\geq 0)]\vee[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j>0)\wedge$$
$$(k_2^j\geq 0)\wedge(|V_{H1}^j|\leq V_{max})\rightarrow\{V\in[\overline{|V_{H1}^J|},V_{max}]\}, \quad (32)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j\geq 0)\wedge(k_2^j>0)]\vee[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j>0)\wedge$$
$$(k_2^j\geq 0)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right)\wedge(|V_{H2}^j|\leq V_{max})\rightarrow\{V\in[\overline{|V_{H2}^J|},V_{max}]\}, \quad (33)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j\geq 0)\wedge(k_2^j>0)]\vee[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j>0)\wedge$$
$$(k_2^j\geq 0)\wedge\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\wedge(|V_{H1}^j|>V_{max})\rightarrow\{V\in\emptyset\}, \quad (34)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j\geq 0)]\vee[(n_1^j<0)\wedge(k_1^j>0)\wedge(k_2^j\geq 0)\wedge$$
$$\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\wedge(|V_{H1}^j|>V_{max})\rightarrow\{V\in\emptyset\}, \quad (35)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j>0)\wedge(k_2^j\geq 0)]\vee[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j\geq 0)\wedge$$
$$(k_2^j>0)\wedge[\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\leq V_{max}]\}\rightarrow\{V\in\left[0,\overline{\left|V_{H2}^J\right|}\right]\}, \quad (36)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j>0)\wedge(k_2^j\geq 0)]\vee[(n_1^j<0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j\geq 0)\wedge$$
$$(k_2^j>0)\wedge[\left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right)\leq V_{max}]\}\rightarrow\{V\in[0,\overline{|V_{H1}^J|}]\}, \quad (37)$$

$$\{(n_1^j>0)\wedge(n_2^j<0)\wedge(k_1^j>0)\wedge(k_2^j\geq 0)][(n_1^j<0)\wedge(n_2^j>0)\wedge(k_1^j\geq 0)\wedge(k_2^j>0)\wedge$$
$$[\left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|<\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right)\wedge(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|>V_{max}]]\}\rightarrow\{V\in[0,V_{max}]\}, \quad (38)$$

$$\{(n_1^j > 0) \wedge (n_2^j < 0) \wedge (k_1^j > 0) \wedge (k_2^j \geq 0)] \vee [(n_1^j < 0) \wedge (n_2^j > 0) \wedge (k_1^j \geq 0) \wedge (k_2^j > 0) \wedge [(|\overrightarrow{V_{H1}^J}| > |\overrightarrow{V_{H2}^J}|) \wedge (|\overrightarrow{V_{H1}^J}| > V_{max}]\} \rightarrow \{V \in [0, V_{max}]\} \quad (39)$$

$$\{(n_1^j > 0) \wedge (n_2^j < 0) \wedge (k_1^j \leq 0) \wedge (k_2^j < 0)] \vee [(n_1^j < 0) \wedge (n_2^j > 0) \wedge (k_1^j \leq 0) \rightarrow \{V \in \emptyset\}, \quad (40)$$

$$\left\{\left(n_1^j > 0\right) \wedge \left(k_1^j > 0\right) \wedge \left(n_2^j < 0\right) \wedge \left(k_2^j < 0\right)\right] \vee \left[\left(n_1^j < 0\right) \wedge \left(k_1^j < 0\right) \wedge \left(n_2^j > 0\right) \wedge \left(k_2^j > 0\right)\right] \wedge \left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right| < \left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right| < V_{\max}\right)\right\} \rightarrow \left\{V \in \left[0, \left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right]\right\}, \quad (41)$$

$$\left\{\left(n_1^j > 0\right) \wedge \left(k_1^j > 0\right) \wedge \left(n_2^j < 0\right) \wedge \left(k_2^j < 0\right)\right] \vee \left[\left(n_1^j < 0\right) \wedge \left(k_1^j < 0\right) \wedge \left(n_2^j > 0\right) \wedge \left(k_2^j > 0\right)\right] \wedge \left(\left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right| < \left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right|\right) \wedge \left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right| > V_{\max}\right]\right\} \rightarrow \left\{V \in \left[0, V_{\max}\right]\right\}, \quad (42)$$

$$\left\{\left(n_1^j > 0\right) \wedge \left(k_1^j > 0\right) \wedge \left(n_2^j < 0\right) \wedge \left(k_2^j < 0\right)\right] \vee \left[\left(n_1^j < 0\right) \wedge \left(k_1^j < 0\right) \wedge \left(n_2^j > 0\right) \wedge \left(k_2^j > 0\right)\right] \wedge \left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right| < \left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right| < V_{\max}\right)\right\} \rightarrow \left\{V \in \left[0, \left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right]\right\}, \quad (43)$$

$$\left\{\left(n_1^j > 0\right) \wedge \left(k_1^j > 0\right) \wedge \left(n_2^j < 0\right) \wedge \left(k_2^j < 0\right)\right] \vee \left[\left(n_1^j < 0\right) \wedge \left(k_1^j < 0\right) \wedge \left(n_2^j > 0\right) \wedge \left(n_2^j > 0\right) \wedge \left(k_2^j > 0\right)\right] \wedge \left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right| < \left|\overrightarrow{V_{H1}^J}\right|\right) \wedge \left(\left|\overrightarrow{V_{H2}^J}\right| > V_{\max}\right]\right\} \rightarrow \left\{V \in \left[0, V_{\max}\right]\right\}. \quad (44)$$

Вирішуюче правило (22-44) описує всі можливі співвідношення для задач пошуку і є прийнятним як для динамічних, так і інформаційних об'єктів.

Слід зазначити, що вирішуюче правило (22-44) одночасно враховує розв'язання задач пошуку і переслідування. Це досягається завдяки врахуванню можливості зближення ПС з ОП під час пересікання границі кола з радіусом $d_{\text{пр}}^i$ для *i*-го ОП (рис.). При вході в межі та виході за межі кола при його перетині лінією відносного руху точка входу визначає розв'язання для задачі пошуку, а точка виходу визначає розв'язання для задачі переслідування.

Висновки. Для розв'язання задачі пошуку, оцінювання ситуації та синтезу стратегії цілеспрямування у просторі пошуку синтезовано предикативну структуру (22-44), яка є вирішуючим правилом граматики $\Gamma_{пр}^0$, що являє собою детермінований опис алгоритму розрахунку інформаційного образу рішень при синтезі ланцюжків за алфавітом S^0 згідно з виразом (14). Тобто розв'язується задача перетворення вхідної інформації у вихідну для автоматизованої чи автоматичної системи синтезу та прийняття рішень. Тим самим на виході системи формується інформаційний клас (образ), який є похідним щодо параметрів та ознак образів, які розпізнаються й аналізуються ПС.

Тим самим за граматикою $\Gamma_{пр}^0$ формується алфавіт S^0, який регламентує індивідуальну стратегію ПС, виходячи з вимог політики безпеки (для інформаційно-телекомунікаційних систем), нормативних документів (на транспорті), мети переміщення у просторі спостереження тощо.

Список використаних джерел

1. *Айзекс Р.* Дифференциальные игры / Р. Айзекс. – М. : Мир, 1967. – 480 с.

2. *Кривонос Ю. Г.* Динамические игры с разрывными траекториями / Ю. Г. Кривонос, И. И. Матичин, А. А. Чикрий. – К. : Наукова думка, 2005. – 220 с.

3. *Поспелов Д. И.* Ситуационное управление: теория и практика / Д. И. Поспелов. – М. : Наука, 1986. – 288 с.

4. *Ющенко А. С.* К теории деятельности эргатических мехатронных систем / А. С. Ющенко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2000. – № 3. – С. 2-11.

5. *Ким Д. П.* Методы поиска и преследования подвижных объектов / Д. П. Ким. – М. : Наука, 1989. – 336 с.

6. Семко В. В. Модель конфлікту взаємодії об'єктів кібернетичного простору / В. В. Семко // Проблеми управління та інформатизації. – 2012. – Вип. № 2 (38). – С. 88-92.

УДК 004.93:004.896:681.7.02

А.В. Ярмілко, ст. викладач
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси, Україна

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ У ДІАГНОСТИЦІ ТА УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ МІКРООБРОБЛЕННЯМ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

А.В. Ярмилко, ст. преподаватель
Черкасский национальный университет имени Богдана Хмельницкого, г. Черкассы, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ДИАГНОСТИКЕ И УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ МИКРООБРАБОТКОЙ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

A.V. Yarmilko, senior lecturer
Bohdan Khmelnytsky National University at Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

APPLYING THE IMAGING TECHNIQUES FOR DIAGNOSTICS AND CONTROLLING OF ELECTRON-RADIAL STREAM MICROMACHINING OF THE OPTICAL MATERIALS

Запропоновано використання візуального каналу спостереження для діагностики та управління електронно-променевим обробленням оптичних матеріалів, встановлення показників якості скляних пластин за метричними та статистичними оцінками, отриманими за кольоровими растровими зображеннями оптичних ефектів після оброблення поверхні скла стрічковим електронним потоком. Представлено результати виділення візуальних ознак із зображень з подвійним променезаломленням у модифікованому поверхневому шарі. Розроблено структуру інтелектуального регулятора для керування електронно-променевим обробленням за даними візуалізації.

Ключові слова: *методи візуалізації, оптичні матеріали, електронно-променеве оброблення, діагностика, інтелектуальне керування.*

Предложено использование визуального канала наблюдения для диагностики и управления электронно-лучевой обработкой оптических материалов, установление показателей качества стеклянных пластин на основе метрических и статистических оценок, полученных при обработке цветных растровых изображений оптических эффектов после обработки поверхности стекла ленточным электронным потоком. Представлены результаты выделения визуальных признаков из изображений с двойным лучепреломлением в модифицированном поверхностном слое. Разработана структура интеллектуального регулятора для управления электронно-лучевой обработкой по данным визуализации.

Ключевые слова: *методы визуализации, оптические материалы, электронно-лучевая обработка, диагностика, интеллектуальное управление.*

The article deals with problem of applying the visual monitoring for diagnostics and controlling of electron-radial stream micromachining of the optical materials. The author have proposed to establish the quality indicators of the glass plates for metric and statistical evaluations, obtained by color raster images of optical effects after surface treatment of glass ribbon electron beam. The results of visual features' selection of the images of birefringence in the modified surface layer are obtained. This article also represented the structure of intelligent controller for controlling electron beam processing for data visualization.

Key words: *imaging techniques, optical materials, electron-radial stream micromachining, diagnostics, intelligent control.*

Постановка проблеми. Технологічні процеси сучасного виробництва у багатьох випадках потребують прецизійного управління з використанням складних моделей. До таких процесів відноситься електронно-променеве мікрооброблення оптичного скла. Суттю цього процесу є усунення тріщин та згладжування мікрорельєфу поверхні скляних виробів. Для оброблення використовують електронно-променеву гармату Пірса, розташовану у вакуумній установці, яка генерує стрічковий електронний потік питомої

потужності 10^1 Вт/см^2 ≤ $P_{пит}$ ≤ 10^5 Вт/см^2. Електронна стрічка може переміщуватися по поверхні виробу зі швидкістю $\upsilon_{пот}$ = 0…20 см/с. При цьому скляна поверхня спочатку оплавляється електронним потоком на глибину до 160 мкм, а потім охолоджується задля формування модифікованого поверхневого шару. При цьому важливим є забезпечення необхідного температурного профілю печі (з точністю ±0,5°С) при максимальній робочій температурі нагріву печі 800 °С [6]. Сформований поверхневий шар відрізняється від основного матеріалу структурою, хімічним складом, оптичними властивостями, мікрогеометрією. Проте процеси електронно-променевого оброблення є досить складними та багатофакторними. Чутливість виробничої системи до поточного стану діючих чинників викликає утворення у структурі оброблюваного матеріалу зон з різними фізико-хімічними властивостями (зокрема, залишковим тиском), що суттєво відбивається й на його оптичних властивостях (рис. 1).

Зважаючи на цю обставину, проблема вдосконалення управління процесами електронно-променевого оброблення не втрачає своєї актуальності та вимагає нових рішень.

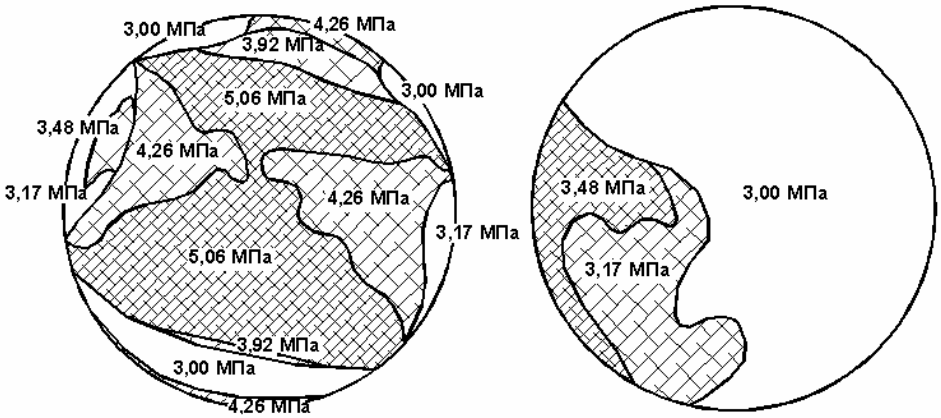


Рис. 1. Розподіл внутрішніх термонапружень в оптичних пластинах (діаметр 20 мм; товщина 6 мм; скло К8), отримані при різних режимах охолодження [6]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорія і практика електронно-променевого оброблення оптичних матеріалів за останні роки набули значного розвитку [1-3; 5-7], який стимулюється практичними потребами мікро- і наноінженерії. Отримання молекулярно-гладких поверхонь та структури оптичного матеріалу із заданими характеристиками потребує досягнення високих показників якості. Для плоскопаралельних скляних пластин якість електронно-променевого мікрооброблення визначають такі параметри [3]:

– середньостатистичний нанорельєф поверхні;

– середньостатистична глибина модифікованого поверхневого шару;

– оптична однорідність (бездефектність, залишкові термонапруження) поверхневого шару;

– площинність поверхні та відхилення від неї;

– залишковий рівень вихідної поверхні.

Фактори, які впливають на якість мікрооброблення, пов'язані зі станом технологічного середовища (залишковим тиском, температурою нагріву та охолодження виробів), досконалістю інструменту оброблення – електронного потоку, можливостями обладнання та програмного забезпечення підтримати гнучкі та якісні режими мікрооброблення. Для забезпечення керування цими параметрами задля отримання потрібної глибини проплавлення оптичної поверхні використовуються математичні моделі, побудовані за теплофізичними характеристиками матеріалу, параметрами електронного потоку та рівнем зниження поверхні. Розроблено алгоритм керування якістю поверхневого шару [3], призна-

чений для використання в інноваційних технологіях створення елементної бази мікрооптики та інтегральної оптики. В основу моделі, на якій базується алгоритм, покладено рівняння задачі теплопровідності, яка описується комплексом одно-, дво- і тривимірних нелінійних математичних моделей. Серед них – моделі теплового впливу стрічкового електронного променя на вироби з оптичних матеріалів різної форми і розмірів, модель оброблення поверхневого шару матеріалу стрічковим електронним потоком з урахуванням явища випаровування частки матеріалу розплаву у вакуум від термічного впливу потоку. Таке модельне представлення процесу оброблення дозволяє досягти певної збіжності з експериментальними даними (відхилення не перевищує 1,4 %).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значні досягнення в розробленні методів управління технологічними процесами електронно-променевого оброблення оптичних матеріалів, забезпечення заданих показників якості виробів потребує впровадження нових підходів до організації процесу оброблення. При цьому для отримання нової якості управління важливо забезпечити збирання та оброблення технологічно значимої діагностичної інформації, у тому числі за рахунок розширення діапазону сигналів технологічного процесу, які фіксуються у процесі оброблення.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є розроблення методу отримання діагностичної інформації за зображенням візуальних ефектів, які виникають у обробленому поверхневому шарі плоскопаралельної скляної пластини, а також розроблення способу її використання в управлінні технологічним процесом.

Виклад основного матеріалу. Подальший розвиток технологій мікрооброблення оптичного скла, а також інших матеріалів спеціального призначення (технічне скло, кварцове скло, оптична кераміка) пов’язується з інтелектуалізацією процесу управління. Такий підхід узгоджується з концепціями, які набули розвитку в останні роки [10; 11]. Нами було запропоновано метод інтелектуального управління, який поєднує принципи оптимальності та адаптивності і забезпечує вибір оптимальної поведінкової стратегії інтелектуального виробничого модуля за критеріальними оцінками, які визначаються під час застосування таких критеріїв відбору: критерію песимізму (Уолда), критерію надзвичайного оптимізму, критерію коефіцієнта оптимізму (Гурвіца), критерію сприятливого в середньому рішення (Лапласа), критерію жалкування (Севіджа) [9]. Реалізація цього підходу потребує розширення джерел забезпечення алгоритмів прийняття рішення оперативними даними про поточний стан технологічної системи. Для їхнього отримання запропоновано запровадити моніторинг візуальних ефектів, пов’язаних з оптичними властивостями оброблених скляних виробів. Оцінювання інформативності візуального сигналу високоенергетичних процесів оброблення, а також ефективність методів виділення інформаційних ознак технологічного процесу та способи їхньої інтерпретації розглядалися у [8].

На основі представленого у [9] методу і дослідженого у [8] способу організації зворотного зв’язку за візуальним каналом нами запропоновано впровадження у структуру управління обладнанням та процесами, які мають властивості загальнотехнічної гнучкості, інтелектуального регулятора, структура якого наведена на рис. 2. Зважаючи на характеристики виробничих комплексів, які використовуються для електронно-променевого мікрооброблення оптичних матеріалів, та особливості перебігу технологічних процесів [6], такий регулятор може бути ефективним і у процесах зазначеного типу.

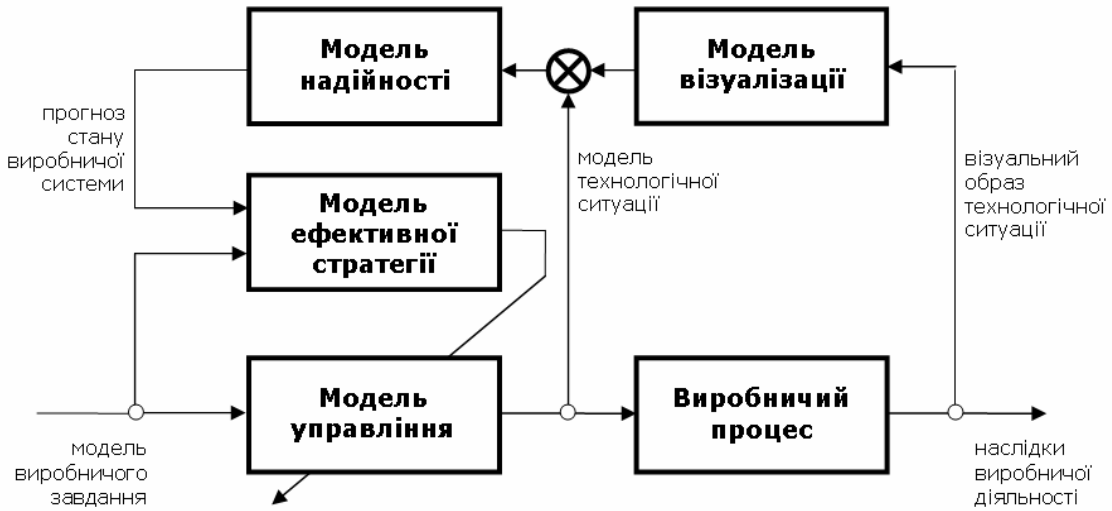


Рис. 2. Структура інтелектуального регулятора

Особливості електронно-променевого оброблення скляних поверхонь дозволяють організувати спостереження за структурно-просторовими змінами пластини за оптичними ефектами, викликаними внутрішніми термічними напруженнями, причиною яких є неоптимальність процесу охолодження після оброблення стрічковим електронним потоком. Так, під час проходження поляризованого світла через оброблені електронним потоком попередньо відполіровані плоскопаралельні пластини з оптичного скла (К8, К108, К208 та ін.) внаслідок подвійного променезаломлювання утворюються області з різними спектральними характеристиками (рис. 3, зони 1, 2, 3), відмінними від параметрів екранованої частини пластини (зона 4) [6; 7]. Аналіз метричних та статистичних характеристик зазначених зон надає дані для модифікації управління технологічним процесом.

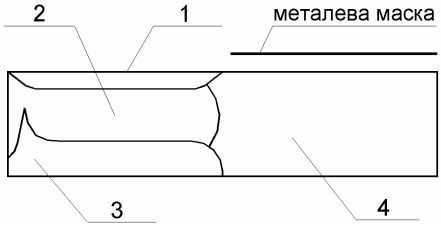


Рис. 3. Області з різними показниками променезаломлення в обробленому оптичному склі

Оцінювання параметрів якості скляної пластини за даними відеоспостереження передбачає застосування методів візуалізації на основі растрових зображень досліджуваного зразка (рис. 4). Такі зразки та технологічне тлумачення оптичних ефектів представлені у роботах [6; 4]. З погляду візуалізації, кольорові растрові зображення є джерелом візуальних ознак різних типів, серед яких – бінарні, тонові, статистичні, спектральні, контурні та інші ознаки.

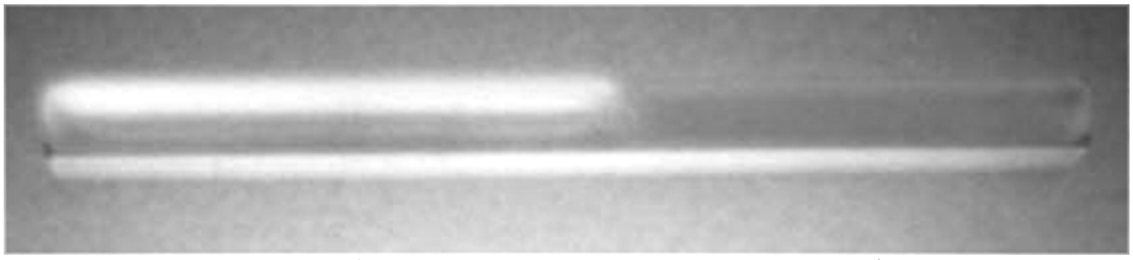


Рис. 4. Подвійне променезаломлення в оптичному склі К8

Для визначення характеристик зон 1, 2, 3 проводилося виділення меж областей зображення з різними спектральними властивостями. Алгоритм оброблення вхідного ко-

льорового зображення передбачав послідовне застосування процедур розмивання Гаусса, бінаризації за вказаними значеннями параметрів каналів RGB, отримання меж із застосуванням алгоритмів Кенні та формування опуклої оболонки. На рис. 5 представлено зображення меж зеленої спектральної області на картині подвійного променезаломлення в оптичному склі К8. Пошук меж виконувався для значень палітри RGB {95; 115; 12} та {167; 234; 175}. Аналогічні результати отримано під час виділення жовтої та жовто-зеленої спектральних областей.

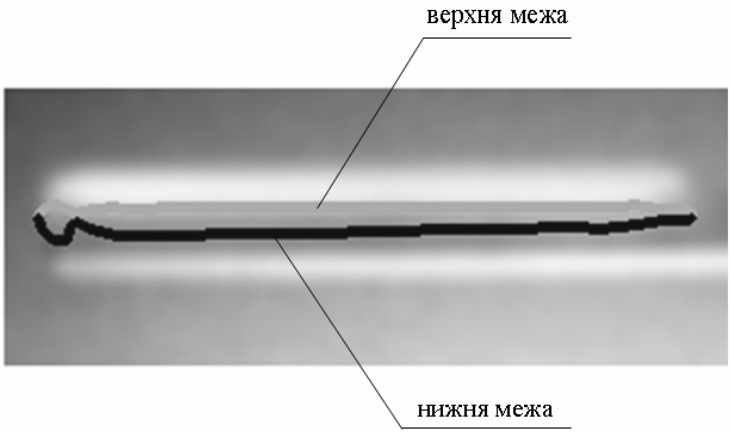


Рис. 5. Зелена спектральна область на картині подвійного променезаломлення

На основі отриманих меж технологічно значимих зон проводилося вимірювання їхньої глибини та визначення статистичних характеристик (рис. 6). Зазначимо, що програма вимірювань може варіювати залежно від завдань моніторингу, проте обмежується технічними характеристиками оптичного каналу спостереження, зокрема – роздільною здатністю відеосенсора. Можлива організація вимірювань як глибини окремих шарів, так і відстані точок отриманих роздільних ліній окремих спектральних областей від базової поверхні (первинної поверхні скляної пластини), що дозволяє отримати дані для визначення наведених у [3] ознак якості виробу.

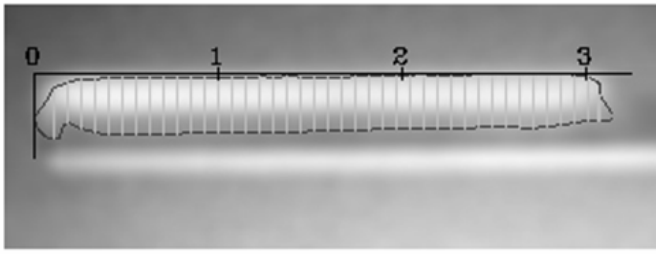


Рис. 6. Виміри глибини жовто-зеленої спектральної області (розміри – у дюймах)

Висновки і пропозиції. Запропонований підхід надає додатковий канал моніторингу виробничого процесу, на основі якого може бути організовано оцінювання якості виробів, експрес-діагностику та прогнозування стану виробничої системи. Перевагами методу є його відносно невисока потреба у ресурсах, безконтактність та оперативність зняття даних, висока придатність до вбудовування в технологічний процес. Отримані результати дозволяють вдосконалити існуючі [3] алгоритми керування електронно-променевим обробленням оптичного скла та запровадити у технологічний процес методи інтелектуального управління. Зокрема, впровадження управління зі зміною експлуатаційних стратегій [9] сприяло б розкриттю потенціалу гнучкості методу та обладнання електронно-променевим обробленням матеріалів. Позитивний економічний ефект може бути отримано за рахунок оперативної зміни експлуатаційних режимів без зупинки технологічного процесу, адресності процедур контролю виробів за результатами експрес-діагностики у процесі їхнього виготовлення, підвищення показників го-

товності обладнання та прогнозованості станів виробничої системи. Технічні ж характеристики апаратних та програмних компонентів систем комп'ютерного зору дозволяють забезпечити достатню відповідність методу потребам технологій мікро- та нанооброблення оптичного скла.

Список використаних джерел

1. *Дудко Г. В.* Проблема формирования особочистых и бездефектных поверхностей / Г. В. Дудко, В. Н. Лисоченко // Материалы краткосрочного семинара. – Л., 1985. – С. 13-16.

2. *Электронно-лучевая* обработка фотокатодных стекол / Г. В. Дудко, А. А. Кравченко, Д. И. Чередниченко [и др.] // Электронная техника. Сер. 4. – 1989. – Вып. 1. – 294 с.

3. *Канашевич Г. В.* Алгоритм керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевій мікрообробці / Г. В. Канашевич, А. І. Щерба, І. В. Дробот // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Х., 2012. – Вип. 27. – С. 231-239.

4. *Канашевич Г. В.* Изменение свойств оптического стекла после электронно-лучевой обработки / Г. В. Канашевич, Д. И. Котельников, Г. Н. Дубровская // Материалы II Всесоюзной конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". – Свердловск, 1991. – С. 86-88.

5. *Канашевич Г. В.* Превращения в поверхностном слое оптического стекла и фотопластин из силикатного стекла от действия низкоэнергетического электронного потока / Г. В. Канашевич // Ежемесячный междисциплинарный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Нано- и микросистемная техника» (Россия). – 2008. – № 10. – С. 28-30.

6. *Канашевич Г. В.* Технологічні основи керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевій мікрообробці : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.07 / Г. В. Канашевич ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К., 2010.

7. *Кравченко А. А.* О формировании предельно гладких поверхностей стекол / А. А. Кравченко, Ю. Н. Лохов, Д. И. Чередниченко // Физика и химия стекла. – 1990. – Т. 16, № 6. – С. 923-927.

8. *Ярмілко А. В.* Експрес-діагностика виробничих процесів за результатами відеоспостережень / А. В. Ярмілко, А. Ю. Небилиця // Матеріали VI науково-практичної конференції з міжнародною участю "Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС '2011". – Чернігів : ФОП Васюта В.В., 2011. – С. 209-212.

9. *Ярмілко А. В.* Формування стратегії керування технологічним модулем за даними поточного моніторингу та експрес-діагностики / А. В. Ярмілко // Математичні машини і системи. – 2013. – № 1. – С. 102-110.

10. *Intelligent* Manufacturing Systems [Electronic resource]. – Access mode : http://www.ims.org/.

11. *Jorge Gamboa-Revilla* and Miguel Ramirez-Cadena. Intelligent Manufacturing Systems : a methodology for technological migration [Electronic resource]. – Access mode : www.iaeng.org/publication/WCE2008/WCE2008_pp1257-1262.pdf.

УДК 004.2

О.О. Кряжич, наук. співроб.
В.Д. Захматов, д-р техн. наук
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ПІДХІД ДО ПЕРЕВІРКИ ВІДПОВІДНОСТІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ІМПУЛЬСНИМИ ЗАСОБАМИ БАГАТОПЛАНОВОГО ЗАХИСТУ

О.А. Кряжич, науч. сотруд.
В.Д. Захматов, д-р техн. наук
Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, г. Киев, Украина

ПОДХОД К ПРОВЕРКЕ СООТВЕТСТВИЯ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ СРЕДСТВАМИ МНОГОПЛАНОВОЙ ЗАЩИТЫ

O.O. Kriazhych, research assistant
V.D. Zakhmatov, Doctor of Technical Sciences
Institute of Telecommunications and Global Information Space in the system of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

THE APPROACH TO THE CHECK OF CONFORMITY OF MANAGEMENT MODEL BY IM PULSE MEANS OF MULTIPLANE PROTECTION

Проаналізовано підхід до визначення відповідності моделі виконання функцій і завдань управління імпульсними засобами багатопланового захисту потребам підприємства та навколишнього середовища. Запропоновано підхід ідентифікації типів ресурсів на основі балансового методу з використанням вимог стратегічного управління DOTMLPF, яка використовується для обґрунтування ефективності військових операцій, у тому числі рятувальних місій у місцях катастроф. Розглянута можливість вирішення оптимізаційних задач для формування набору оціночних значень за кожною з вимог стратегічного управління.

Ключові слова: *модель, ресурси, регламент, рішення, інформація, оціночне значення.*

Проанализирован подход к определению соответствия модели выполнения функций и задач управления импульсными средствами многоплановой защиты потребностям предприятия и окружающей среды. Предложен подход идентификации типов ресурсов на основе балансового метода с использованием требований стратегического управления DOTMLPF, которые используются для обоснования эффективности военных операций, в том числе спасательных миссий в местах катастроф. Рассмотрена возможность решения оптимизационных задач для формирования набора оценочных значений по каждому пункту требований стратегического управления.

Ключевые слова: *модель, ресурсы, регламент, решение, информация, оценочное значение.*

In work the approach to definition of conformity of model of performance of functions and management problems im pulse means of multiplane protection the analysis is made. It for definition of conformity to requirements of the enterprise and environment is made. The approach of identification of types of resources on the basis of a balance method with use of requirements of strategic management DOTMLPF is offered. Possibility of the decision of optimising problems for formation of a set of estimated values on each point of requirements of strategic management is considered.

Key words: *model, resources, regulations, decision, information, estimated value.*

Постановка проблеми. Визначення відповідності моделі потребам підприємства проводиться за певними істотними критеріями. При цьому важливим фактором для обґрунтування будь-якої моделі є докази щодо ефективності використання ресурсів (засобів, фінансів, часу, зусиль учасників). Все перелічене в цілому можна описати балансуванням обмеженнями ресурсів і узгодженням інтересів [1] у процесі реалізації ієрархії повноважень з виконання функцій і завдань управління як на рівні підприємства, так і на рівні взаємодії підприємства та навколишнього середовища. При цьому слід зауважити, що для моделі, яка відбиває розвиток ситуації в аварійному (кризовому) стані, необхідним є врахування часу та ступеня виконання регламентних процедур в умовах обмежених ресурсів [2]. Проблема полягає в тому, що не завжди існуючі методики перевірки відповідності моделей щодо здатності виконувати необхідні функції і завдання управління, здатні визначити оцінку моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження можливостей застосування вимог стратегічного управління DOTMLPF для перевірки моделей управління невійськовою сферою дуже незначне, адже вимоги розроблялися саме для визначення ефективності військових місій і операцій. Але орієнтація багатьох країн світу на скорочення чисельності

армій, диверсифікація, зростання кількості техногенних та природних катастроф, до ліквідації наслідків яких залучають військових, підвищення вимог до моделей управління попередження та ліквідації аварій на промислових об'єктах викликала необхідність адаптації військових методик для обґрунтування ефективності цивільних операцій та проектів. Окремі аспекти використання DOTMLPF у цивільній сфері висвітлюються в роботах Т.Р. Дорла, Х. Кенді, Д.К. Елріча та ін. В Україні дослідженню застосування вимог стратегічного управління DOTMLPF для визначення ефективності організаційних систем присвячені роботи В.В. Вишневського, О.В. Малишева, В.Г. Калмикова [3].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У всіх проаналізованих роботах запропоновано застосування вимог DOTMLPF на основі експертних оцінок. Це вносить певний суб'єктивний слід до формування загального оцінювання ефективності досліджуваної системи. У багатьох випадках для визначення відповідностей моделей складних систем експертні оцінки повинні базуватися на чіткому визначенні окремих показників, що не досліджувалося за умов використання зазначених стратегічних вимог.

Мета статті. Метою статті є формування підходу з використанням формалізованих процедур для перевірки відповідності моделі управління імпульсними засобами багатопланового захисту вимогам підприємства та навколишнього середовища у разі локалізації і ліквідації аварійної ситуації на хімічному підприємстві.

Виклад основного матеріалу. Будь-яке підприємство хімічної промисловості є потенційно небезпечним об'єктом за вибухом і пожежею, а імпульсні засоби багатопланового захисту визначаються як особиста зброя пожежного [4]. Тож випадок локалізації і ліквідації аварії на хімічному підприємстві дуже схожий за умовами до військової операції, що доводить спорідненість ситуацій і можливість застосовувати вимоги DOTMLPF.

Під час формування підходу з перевірки відповідності моделі управління імпульсними засобами багатопланового захисту за основу була обрана теза, що «оцінкою роботи будь-якої системи … на будь-якому стані створення або розвитку є готовність виконувати ті функції, заради яких ця система, або підприємство створювались. У той же час готовність виконувати очікувані від системи функції залежить від наявності ресурсів, необхідних для виконання цих функцій» [3].

Вимоги стратегічного управління DOTMLPF містять інтерпретації основних термінів (табл. 1) [5], концептуальні основи до формування пріоритетів операцій та багатосторінкові опитувальні таблиці для експертів, на основі яких будується висновок щодо вірогідності ефективності місії.

Таблиця 1

Вимоги стратегічного управління DOTMLPF

Літера / термін	Переклад	Визначення
D – Doctrine	Доктрина	Принципи досягнення цілей. Утримують нормативні документи, якими користується підприємство для досягнення цілей
O – Organization	Організація	Організаційна структура системи, зв'язки та повноваження
T – Training	Навчання	Навчання персоналу, підвищення кваліфікації, тренінги і т. ін.
M – Materiel	Матеріальна база	Всі матеріальні ресурси системи, їх стан та ступінь використання, окрім нерухомого майна. У межах забезпечення імпульсної вибухопожежної системи – все обладнання, яке дає змогу запобігти аварії
L – Leadership	Керівництво	Здатність керівництва впливати на персонал з метою чіткого забезпечення виконання рішень
P – Personnel	Персонал	Співробітники, які забезпечують функціонування системи
F – Facilities	Нерухомість, можливості	Будинки та споруди, які призначені для забезпечення функціонування системи

Крім зазначеного, існують модифіковані вимоги DOTMLPF-P для окремих місій, де P (Policy) – політика щодо населення та природного середовища.

З метою обґрунтування відповідності проектованої моделі оброблення інформації для підтримки прийняття рішень з управління імпульсним вибухопожежним захистом потребам підприємства (мікросистеми – МіС) та середовища (макросистеми (МаС) пропонується підхід ідентифікації типів ресурсів на основі балансового методу з використанням зазначених вимог DOTMLPF. Всі необхідні для аналізу типи ресурсів пропонується визначати за паспортом об'єкта, створеного на основі плану ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС), зорієнтованого на забезпечення захисту за допомогою імпульсних вибухопожежних засобів. У цьому разі актуальною є задача представлення формального критерію оцінювання балансу ресурсів *X*, виконання регламентних процедур (РО) *Y*, реалізації повноважень персоналу *Z* та часу виконання дій *T*, що пропонується у вигляді алгоритму.

Алгоритми можливого розвитку подій і шляхів локалізації та ліквідації ситуації у разі її виникнення на об'єкті наводяться у картках подій ПЛАСу хімічного підприємства. Запропонований підхід до перевірки відповідності за вимогами DOTMLPF-P (табл. 2) дозволяє здійснювати обґрунтування оцінок експертів щодо відповідності моделі імпульсного вибухопожежного захисту потребам підприємства та навколишнього середовища.

Таблиця 2

Представлення підходу до перевірки на відповідність моделей за вимогами DOTMLPF-P

№	Літера	Назва й зміст процедур і операцій	Формалізоване представлення
1	2	3	4
1	D, O, L	Розрахунок часу виконання локалізації чи ліквідації на кожному рівні захисту імпульсної системи у разі гіпотетичної аварії (конкретний підрозділ – ПДР, характеристики приміщень, характеристики речовин, стан фондів та ін.)	Термін дій визначають нормативні документи та письмові й усні розпорядження, в яких сформульовані чіткі завдання
1.1	D	Коли має бути досягнуто результату	$T = t+\Delta t$
1.2	O	Скільки є часу на організацію дій	$(\Delta t \geq t_1+t_2+\ldots+t_n)$
1.3	L	Скільки є часу на прийняття рішення	$(t_1+t_2+t_3)$
1.4	O	Як оптимально розподілити термін часу	$(t_1+t_2+t_3) \rightarrow opt$
2	D, M, P, P-2	Усвідомлення завдання (кожного рівня системи імпульсного вибухопожежного захисту) у разі гіпотетичної аварії A, B або C	Інформаційну основу складає документ (наказ, директива, розпорядження) осіб, що приймають рішення (ОПР) вищого рівня
2.1	D	Якими є мета дій (*F*), ресурси (*x*), РО (*y*), повноваження для їх реалізації (*z*), часові обмеження ($t+\Delta t$) – тобто, чи достатньо встановлених засобів, враховані всі особливості як установки засобів, так і самого об'єкта для подолання аварії, що аналізується	$F = f(x,y,z, t+\Delta t)$
2.2	P	Місце і роль персоналу та об'єкта в завданні з локалізації та ліквідації ситуації	$y; z$
2.3	M	Який ресурс імпульсних засобів (автоматичних, автоматизованих, керованих персоналом) визначено для дій з виконання завдання	x
2.4	M	Яким додатковим вибухопожежним ресурсом підтримають дії в аварійному ПДР з локалізації та ліквідації цієї ситуації, в якому місті і в який час	$(x+\Delta x); (y+\Delta y)$
2.5	M	Кого, як і яким ресурсом підтримає аварійний ПДР у разі розвитку ситуації	$(x-\Delta x); (y-\Delta y)$
2.6	P-2	Що означає для конкретного рівня імпульсної вибухопожежної системи «ефективна локалізація»	$\{F''(x,y,z,t)\}$

Продовження табл. 2

1	2	3	4
3	M, F	Оцінювання обставин з часу задіяння будь-якого рівня імпульсної вибухопожежної системи у разі гіпотетичної аварії	Інформаційну основу складають дані моніторингу об'єкта, середовища, процесів взаємодії
3.1	M	Які є системні обмеження на розвитку подій щодо ресурсів імпульсної вибухопожежної системи відносно стану об'єкта загалом (чи є помилки прицілювання, чи не порушений допуск встановлення, чи правильно вирахуване розташування)	$X(t); Y(t); Z(t) \rightarrow opt$
3.2	F	Які є системні обмеження на масштабі поточного функціонування імпульсної вибухопожежної системи	$x(t); y(t); z(t) \rightarrow opt$
4	D, O	Формулювання замислу дій щодо локалізації і ліквідації аварійної ситуації у разі гіпотетичної аварії	Генерування концепції особистого рішення у разі гіпотетичної аварії
4.1	D	Мета дій імпульсної вибухопожежної системи за визначеним від МаС завданням	$F = f(x,y,z, t+\Delta t)$
4.2	O	Структурна організація підрозділів, ресурсів та регламенту їх застосування для реалізації завдання з локалізації та ліквідації аварійної ситуації	$x; y; z; (t+\Delta t)$
5	L, P, P-2	Формулювання вольового акту за підсумками локалізації та ліквідації гіпотетичної аварії	Аналіз, синтез, оцінювання ситуації, розроблення рекомендації щодо недопущення повторення
5.1	L	Висновки з оцінювання обставин щодо локалізації та ліквідації аварії	$x(t); y(t); z(t)$. Обмеження добові, сезонні, погодні, технологічні і т. ін.
5.2	P	Роль і місце МіС у вирішенні завдання МаС з локалізації та ліквідації аварії	Імпульсні вибухопожежні засоби $\{F'(x,y,z,t)\}$
5.3	L	Замисел реалізації завдання для імпульсної вибухопожежної системи	$\{F''(x,y,z,t)\}$
5.4	P-2	Завдання підрозділам у разі задіяння імпульсної вибухопожежної системи: – щодо досягнення мети об'єкта; – щодо взаємодії з іншими об'єктами і середовищем та дотримання екобалансу	$F(x,y,z,)=F_1+ +F_2+\ldots+F_i+\ldots+F_k$ $F(x\pm\Delta x; y\pm\Delta t; z\pm\Delta z; t+\Delta t) =$ $= F_1+ F_2+\ldots+F_i+\ldots+F_k$ $\{F''(x,y,z,t)\} \rightarrow opt$
5.5	P	Регламент управління виконанням завдання у разі задіяння імпульсної вибухопожежної системи: – ієрархія та регламент адміністрування; – ієрархія та регламент моніторингу	$\{F''(x,y,z,t)\}упр \rightarrow opt$
5.6	P	Оцінювання регламенту персоналу у разі повного ручного управління імпульсним вибухопожежним захистом	$\{F''(x,y,z,t)\} \rightarrow opt$
5.7	L	Концепція подальших дій із забезпечення вибухопожежного захисту	$\{F'''(x,y,z,t)\}$
6	O, M	Взаємне інформування щодо реалізації дій у разі гіпотетичної аварії	Забезпечення відповідності критеріям своєчасності, повноти та достовірності інформації
6.1	O	Інформування про реалізацію завдання із забезпечення імпульсного вибухопожежного захисту	$\{F''(x,y,z,t)\}=\{F'''(x,y,z,t)\}$
6.2	M	Інформування про витрату ресурсів, порушення регламенту, порушення повноважень, перевищення ліміту часу стосовно плану (наказу) у разі задіяння імпульсних засобів багатопланового захисту на різних рівнях	$(x,y,z, t+\Delta t)''=(x,y,z, t+\Delta t)'''$

Закінчення табл. 2

1	2	3	4
7	O, L	Оцінювання ситуації у разі гіпотетичної аварії	Реалізація відповідальності за виконання завдання та за збереження стійкості МіС за допомогою імпульсних засобів багатопланового захисту
7.1	L	Оцінювання стійкості ОПР у реалізації завдання з повного ручного управління імпульсним вибухопожежним захистом	$(x,y,z,\ t+\Delta t)'=(x,y,z,\ t+\Delta t)''=(x,y,z,\ t+\Delta t)''' \rightarrow opt$
7.2	O	Оцінювання досягнення мети дій із забезпечення імпульсного вибухопожежного захисту на різних рівнях	$\{F'(x,y,z,t)\}=\{F''(x,y,z,t)\}=\{F'''(x,y,z,t)\} \rightarrow opt$
8	T, M	Аналіз ефективності дій у разі гіпотетичної аварії	Реалізація аналітичних повноважень у разі ліквідації гіпотетичної аварії за допомогою імпульсних засобів за моделлю, що аналізується
8.1	T	Аналіз якості реалізації повноважень під час локалізації та ліквідації ситуації	$\{F'(x,y,z,t)\}=\{F''(x,y,z,t)\}=\{F'''(x,y,z,t)\}$
8.2	M	Аналіз економії ресурсу, часу при задіянні традиційної та імпульсної техніки вибухопожежного захисту	$(x,y,z,\ t+\Delta t)'=(x,y,z,\ t+\Delta t)''=(x,y,z,\ t+\Delta t)'''$
9	O, T, M, P	Підготовка звіту щодо гіпотетичної аварії	Реалізація вимог МаС до звіту
9.1	O	Звіт про стан реалізації завдання з локалізації гіпотетичної аварії за допомогою імпульсних засобів багатопланового захисту	$\{F'(x,y,z,t)\}=F'''(x,y,z,t)\}$
9.2	P	Звіт про стан реалізації рішень ОПР після завершення завдання	$(x,y,z,\ t+\Delta t)'=(x,y,z,\ t+\Delta t)'''$
9.3	T	Потреби в удосконаленні повноважень ОПР із забезпечення імпульсного вибухопожежного захисту	$\{F'(x,y,z,t)\} \rightarrow opt$
9.4	M	Потреби в удосконаленні ресурсної бази, регламенту, кваліфікації ОПР	$(x,y,z,\ t+\Delta t)' \rightarrow opt$

Також слід зазначити, що застосування третього – ситуаційного (в умовах можливих масштабів кризи) – рівня оброблення інформації для підтримки прийняття рішень з управління імпульсним вибухопожежним захистом вимагає деякого поглиблення у запропонованому підході до перевірки. Це обумовлено тим, що на цьому етапі формалізованих варіантів рішень за отриманою інформацією вже може не існувати, і мотивація людини виступить вирішальним фактором реалізації дій. Мотивація відносно ситуаційного управління імпульсним вибухопожежним захистом буде достатньою, якщо в рішенні на виконання дії визначена інформація відносно:

– мети $F=f(x,y,z,\ t+\Delta t)$ та окремих завдань за аспектами складної дії $F(x,y,z,)=F_1+F_2+\ldots+F_i+\ldots+F_k$;

– достатності ресурсів, їх структурної організації ($x=x_1+x_2+\ldots+x_i+\ldots+x_k$);

– достатності повноважень для здійснення дій у колі повноважень на підприємстві ($z=z_1+z_2+\ldots+z_i+\ldots+z_k$);

– визначеності регламенту функціонування ($y=y_1+y_2+\ldots+y_i+\ldots+y_k$);

– визначеності часових (просторових) обмежень ($t+\Delta t$).

Кризове управління за своєю суттю є етапом екстреної реорганізації ресурсів задля виконання завдання ліквідації кризи. Рішенням для ОПР фактично є терміновий проект об'єкта, який повинен стати системою виведення ситуації з кризи. На цьому етапі залучаються додаткові сторонні ресурси, техніка, яка належить місту чи області для ліквідації

аварії на потенційно небезпечному підприємстві. Тоді підхід до перевірки на відповідність моделі імпульсного вибухопожежного захисту потребам хімічного підприємства має містити обов'язковий поглиблений розділ щодо дослідження відповідності змісту процедур і операцій наявним власним та додатковим ресурсам за умов кризового управління.

Для формування оціночних значень показника ефективності управління можна використати критерій обмежень ресурсів, засобів, сил, часу для кожної категорії (або інші істотні критерії обмежень), тобто порівняти, яке рішення було прийняте та яке відсоткове значення було досягнуте на основі наявної інформації для забезпечення вирішення завдань підприємства і наскільки в цілому підприємство, як відкрита система, було утримане у стані стійкості.

Висновки і пропозиції. В цілому можна зазначити, що запропонований підхід до перевірки на відповідність моделі імпульсного вибухопожежного захисту потребам хімічного підприємства, розроблений з використанням балансового методу, дозволяє особам, що приймають рішення, отримати інформацію про реальний стан готовності хімічного підприємства протистояти вибухопожежній загрозі в тій мірі, яка дозволяє не допустити кризу, завдяки використанню процедур штатного і кризового управління. Запропонований підхід не відкидає експертне оцінювання ефективності роботи, а лише доповнює експертні методи математичним обґрунтуванням.

Список використаних джерел

1. *Ведута Н. И.* Социально-эффективная экономика / Н. И. Ведута ; под общ. ред. д-ра экон. наук Е. Н. Ведуты. – М. : Издательство РЭА, 1999. – 254 с.

2. *Методические* рекомендации по изучению пожаров. – М. : Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2005. – 64 с.

3. *Вишневский В.* Обобщенная оценка организационных систем / В. Вишневский, В. Калмыков, О. Малышев // Information Models of Knowledge. – Киев-София, 2005. – С. 46-50.

4. *Захматов В. Д.* Личное оружие пожарного для тушения пожаров в лесах, небоскрёбах и зонах катастроф / В. Д. Захматов // Пожарная безопасность в строительстве. – М. : Пожнаука, 2011. – № 5. – С. 58-65.

5. *DOTMLPF* [Electronic resource]. – Access mode: http://www.pg0.com/dnn/Pg0QsetView/tabid/290/smid/671/ArticleID/13/t/ DOTMLPF.

РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.05

П.Д. Лежнюк, д-р техн. наук
С.В. Кравчук, студент
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ ПІД'ЄДНАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ І ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

П.Д. Лежнюк, д-р техн. наук
С.В. Кравчук, студент
Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

P.D. Lezhniuk, Doctor of Technical Sciences
S.V. Kravchuk, student
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

OPTIMIZATION OF A CONNECTION OF NON-TRADITIONAL RENEWABLE ENERGY IN ELECTRIC NETWORKS

Розглянуто основні умови пошуку оптимальних місць під'єднання нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії з метою забезпечення якісного, надійного та оптимального з погляду зменшення втрат активної потужності функціонування електричних мереж.

Ключові слова: *нетрадиційні і відновлювальні джерела електроенергії, оптимізація роботи, розосереджене генерування.*

Рассмотрены основные условия поиска оптимальных мест подключения нетрадиционных и возобновляемых источников электроэнергии с целью обеспечения качественного, надежного и оптимального, с точки зрения уменьшения потерь активной мощности, функционирования электрических сетей.

Ключевые слова: *нетрадиционные и возобновляемые источники электроэнергии, оптимизация работы, рассредоточенное генерирование.*

The basic conditions of optimal locations connecting alternative renewable energy sources, in order to ensure quality, reliable and optimal in terms of reduction of active power losses, the operation of electrical networks.

Key words: *alternative renewable energy, optimization of dispersed generation.*

Постановка проблеми. Згідно з концепцією впровадження SMART Grid's технологій в Україні, покращення якості функціонування, надійності та всебічного розвитку електроенергетичної системи (ЕЕС) потрібно здійснювати за рахунок збільшення частки нетрадиційних і відновлювальних джерел електроенергії (НВДЕ). Децентралізація енергопостачання за допомогою НВДЕ дозволить диверсифікувати джерела енергії [1]. Важливим чинником для забезпечення ефективного використання НВДЕ є пошук оптимальних місць підключення та схем видачі електричної енергії. Така схема повинна відповідати вимогам по надійності електропостачання, а місце приєднання розміщуватись максимально наближено до центру споживання, що дозволить забезпечити мінімум втрат електричної потужності під час її транспортування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впровадження в електричні мережі (ЕМ) джерел розосередженого генерування, що базуються на використанні НВДЕ, значною мірою зменшують рівень «забруднення» навколишнього середовища. Розміщення НВДЕ безпосередньо біля споживача буде впливати на зміну перетоків потужності залежно від вузлового навантаження, при узгодженому підключенні дасть можливість зменшити втрати активної потужності та здійснювати вплив на рівні напруги в усталеному режимі роботи ЕМ [2]. Пошук оптимальних умов підключення НВДЕ розглядається в [3] як багатокритеріальна задача, що має певні обмеження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Досліджується вплив НВДЕ на режим роботи електричної мережі з метою мінімізації втрат активної потужності в умовах зміни місця та потужності розосереджених джерел генерування (РДГ).

Мета статті. Метою роботи є створення методу пошуку місць підключення НВДЕ в ЕМ та визначення оптимальної потужності генерування при забезпеченні стабільної якості функціонування електричних мереж з мінімальним загальносистемним показником – втратами активної потужності. Комплексний підхід у дослідженні цього питання дозволить повніше розкрити потенціал РДГ.

Виклад основного матеріалу. З метою розв'язання поставленої задачі визначаємо втрати потужності у вітках схеми. Значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми визначається за формулою [4]:

$$\dot{S}_в = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{\Sigma_Д} M_\Sigma \cdot \hat{I}_Д , \quad (1)$$

де $\dot{U}_{\Sigma_Д}$ – діагональна матриця напруг у вузлах, включаючи і балансувальні, M_Σ – перша матриця з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансувальні, $\hat{I}_Д$ – спряжена діагональна матриця струмів у вітках схеми.

Якщо вираз (1) помножити зліва на одиничний транспонований вектор n_t, то в результаті отримаємо транспонований вектор втрат потужності у вітках схеми:

$\Delta\dot{S}_{вt} = \sqrt{3} \cdot n_t \dot{U}_{\Sigma_Д} \cdot M_\Sigma \cdot \hat{I}_Д$ або з врахуванням того, що $n_t \dot{U}_{\Sigma_Д} = \dot{U}_t$ отримаємо:

$$\Delta\dot{S}_{вt} = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_t \cdot M_\Sigma \cdot \hat{I}_Д , \quad (2)$$

де $\dot{U}_t$ – транспонований вектор напруг у вузлах, включаючи і балансувальні (тут і далі індекс t означає, що матриця або вектор є транспонованими).

З (2) видно, що втрати в і-й вітці схеми визначаються:

$$\Delta\dot{S}_{вi} = \sqrt{3} \cdot (\dot{U}_t M_{\Sigma_i}) \cdot \hat{I}_i , \quad (3)$$

де M_{Σ_i} – вектор-стовпець матриці інциденцій з'єднань віток у вузлах M_Σ;

$\hat{I}_i$ – спряжений вектор струму в і-й вітці, який може бути визначений через струми у вузлах

$$\dot{I}_i = C_i \dot{J}_\Sigma , \quad (4)$$

де C_i – і-й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах $\dot{J}_\Sigma$ по вітках схеми.

Матриця струморозподілу розраховується методом одиничних струмів або за відомою формулою:

$$C = z_в^{-1} M_{\Sigma_t} \left(M_\Sigma z_в^{-1} M_{\Sigma_t} \right)^{-1} , \quad (5)$$

де $z_в$ – діагональна матриця комплексних опорів віток схеми електричної мережі.

Якщо схема і параметри електричних мереж ЕЕС є відносно незмінними, то застосування методу визначення струмів у вітках за допомогою матриці струморозподілу C є доцільнішим.

Підставивши останній вираз у (3), отримаємо:

$$\Delta\dot{S}_{вi} = \sqrt{3} \cdot (\dot{U}_t M_{\Sigma_i}) \cdot \hat{C}_i \cdot \hat{J}_\Sigma . \quad (6)$$

З врахуванням того, що $\hat{J}_\Sigma = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}^{-1}_{\Sigma_Д} \dot{S}_\Sigma$, (6) можна переписати:

$$\Delta\dot{S}_{вi} = (\dot{U}_t M_{\Sigma_i}) \cdot \hat{C}_i \dot{U}^{-1}_{\Sigma_Д} \dot{S}_\Sigma , \quad (7)$$

де $\dot{S}_\Sigma$ – вектор вузлових навантажень, включаючи і балансувальні.

Позначимо в (7)

$$\dot{T}_i = (\dot{U}_t M_{\Sigma_i}) \cdot \hat{C}_i \dot{U}_Д^{-1}, \tag{8}$$

де $\dot{U}_Д$ – діагональна матриця напруг у вузлах без балансувальних вузлів;

Вектор-рядок $\dot{T}_i$ складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах і-тої вітки складає протікання по ній потужності до кожного вузла [5].

На підставі (7) і (8) можна записати:

$$\Delta\dot{S}_в = \dot{T}_i \cdot \dot{S}_\Sigma, \tag{9}$$

де $\Delta\dot{S}_в$ – вектор сумарних втрат у вітках схеми, $\dot{T}_i$ – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми залежно від потужності у вузлах схеми, кожний рядок якої складається з (8).

Для спрощення розрахунків і зручності використання даних перетворимо матрицю $\dot{T}_i$ у вектор-стовбець $\dot{T}_в$, елементи якого будуть коефіцієнтами розподілу втрат потужності від кожного вузла схеми:

$$\dot{T}_в = \dot{T}_i \cdot N_{од}, \tag{10}$$

де $N_{од}$ – одиничний вектор-стовбець.

Відповідно до [6] визначаємо значення активної потужності, яку потрібно генерувати НВДЕ у вузлі P_i:

$$P_i = P_{ВДЕ} - P_н, \tag{11}$$

де $P_н$ – потужність навантаження вузла; $P_{ВДЕ}$ – активна потужність генерування НВДЕ.

$$P_i = \frac{|U_i| \cdot |U_i|}{R_{i,i}} \cdot \sum_{j=1, j\neq i}^{n} \left[\left[P_j \cos(\delta_i - \delta_j) + jQ_j \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \cdot \frac{R_{i,j}}{|U_i| \cdot |U_j|} \right], \tag{12}$$

де $|U_i|$ – модуль напруги у вузлі; n – кількість вузлів у схемі; $R_{i,j}$ – i та j елемент матриці вузлових опорів схеми, δ_i – фаза в i-тому вузлі, P_j, Q_j – активна та реактивна потужність навантаження в j-тому вузлі відповідно.

Для того, щоб знайти значення активної потужності НВДЕ відповідно до (11) і враховуючи (12), можна застосувати таку формулу:

$$P_{ВДЕ} = P_н + \frac{|U_i| \cdot |U_i|}{R_{i,i}} \cdot \sum_{j=1, j\neq i}^{n} \left[\left[P_j \cos(\delta_i - \delta_j) + jQ_j \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \cdot \frac{R_{i,j}}{|U_i| \cdot |U_j|} \right]. \tag{13}$$

Згідно з (13) визначаємо активну потужність генерування НВДЕ, будь-які інші значення генерованої потужності призведуть лише до збільшення загальних втрат у мережі.

Як приклад розглянемо тестову схему на 14 вузлів рекомендованої IEEE (рис. 1). Восьмий вузол у подальших розрахунках еквівалентовано. У вітках 5-6, 4-7, 4-9 встановлені трансформатори відповідно АТДЦТН-63000/230/121, АТДЦТН-100000/230/121 та АТДЦТН-125000/230/121. Початкові вузлові навантаження, напруги у вузлах, активна і реактивна потужність генерування задана у табл. 1.

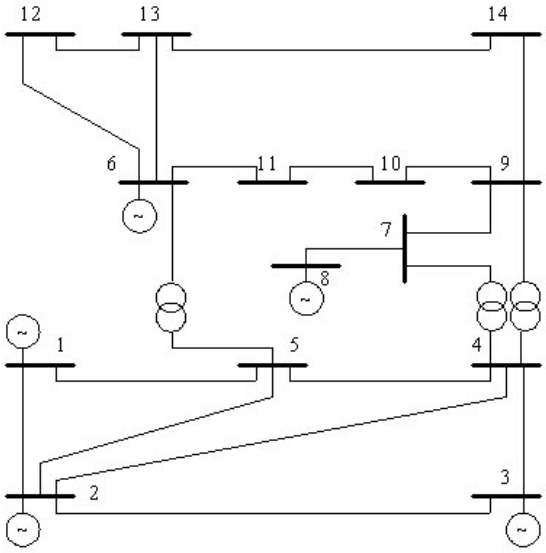


Рис. 1. Тестова схема IEEE

Таблиця 1

Інформація про вузли схеми та коефіцієнти розподілу втрат потужності $\dot{T}_в$

№ вузлів	Параметри						
	U, кВ	Фаза, град	Рн, МВт	Qн, МВАр	Рг, МВт	Qг, МВАр	$\dot{T}_в$
1	243,8	0	0	0	254,52	87,3	Балансуючий вузол
2	229,42	-5,11	21,7	12,7	0	0	-0.058-j0.095
3	213,86	-12,8	94,2	19	0	0	-0.111-j0.253
4	221,83	-10,05	25	-3,9	0	0	-0.081-j0.192
5	224,46	-8,55	7,6	1,6	0	0	-0.074-j0.162
6	117,35	-12,5	11,2	7,5	0	15	-0.075-j0.236
7	122,68	-10,9	2	1	0	15	-0.066-j0.209
8	117,78	-12,5	30	16,6	0	15	-0.083-j0.239
9	116,84	-12,84	9	5,8	0	0	-0.088-j0.247
10	116,71	-12,32	3,5	1,8	0	0	-0.084-j0.245
11	115,71	-13,39	6,1	1,6	0	0	-0.087-j0.256
12	115,32	-13,44	13,5	5,8	0	0	-0.091-j0.259
13	114,52	-14	14,9	5	0	0	-0.102-j0.273

Виконавши відповідні розрахунки, визначили, що сумарні втрати у вітках схеми становлять $\Delta\dot{S}_в = 15{,}725 + j57{,}515$ (МВА).

Використовуючи вектор-стовбець коефіцієнтів розподілу втрат потужності від кожного вузла схеми, визначаємо, що оптимальними місцями підключення НВДЕ будуть 14, 13, 10 та 3 вузли відповідно. З урахуванням того, що 3 вузол має найменше значення коефіцієнта в $\dot{T}_в$, прогнозуємо, що саме встановленням у цьому вузлі джерела генерування можливо досягти оптимального режиму роботи ЕМ, з найменшим значенням втрат активної потужності.

Визначивши місця приєднання НВДЕ, потрібно визначити, яку саме потужність генерування потрібно встановити для досягнення бажаного режиму.

Згідно з вищевказаним алгоритмом, для кожного вузла визначили оптимальну величину генерування активної потужності, але відповідно до коефіцієнтів у $\dot{T}_в$ беремо до уваги лише вузли 13, 12, 9 та 3, результати розрахунків зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів розподілу втрат потужності та оптимальна величина генерування НВДЕ для вказаних вузлів

№ вузла	Коефіцієнт розділу втрат потужності від вузла схеми $\dot{T}$	Потужність генерування $P_{ВДЕ}$, МВт
13	-0,102 - j0,273	64,984
12	-0,091 - j0,259	78,171
11	-0,088 - j0,247	101,875
3	-0,111 - j0,253	147,061

Отримавши інформацію про місця під'єднання та оптимальну величину потужності НВДЕ, визначаємо втрати потужності у вітках схеми. При підключенні джерела генерування в 13 вузол $\Delta\dot{S}_в = 10{,}61 + j34{,}03$ (МВА), в 12 вузол $\Delta\dot{S}_в = 10{,}32 + j32{,}22$ (МВА), в 10 вузол $\Delta\dot{S}_в = 9{,}07 + j28{,}44$ (МВА) та в 3 вузол $\Delta\dot{S}_в = 4{,}36 + j16{,}75$ (МВА). Очевидно, що серед перерахованих вузлів оптимальний режим буде досягнутий при підключення джерела генерування в 3 вузол, а це забезпечить мінімальні втрати активної потужності.

Графічне представлення отриманих результатів зображено на рис. 2.

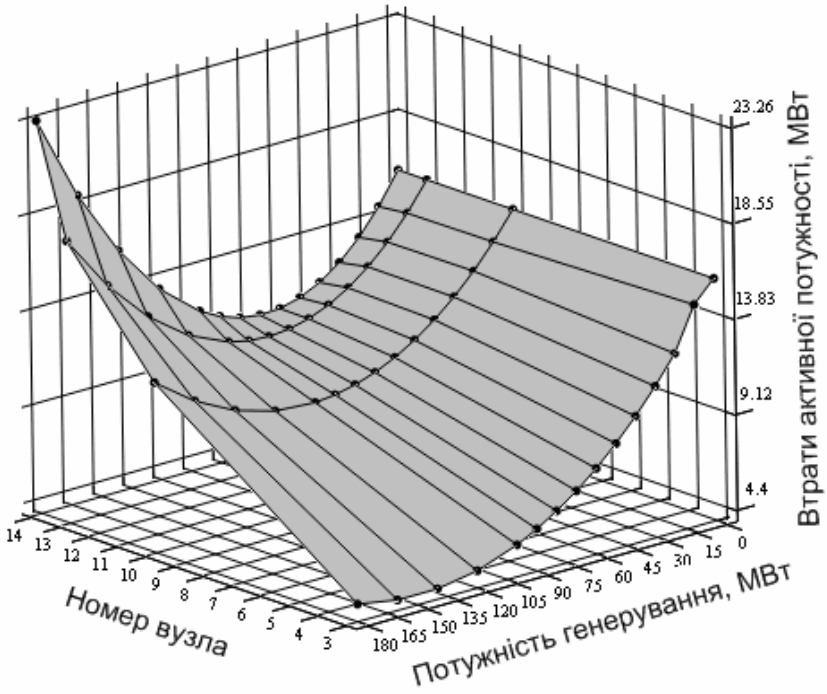


Рис. 2. Графічна залежність втрат активної потужності від зміни вузла та потужності генерування

Висновки. Джерела нетрадиційної і відновлювальної енергії мають різноплановий вплив на роботу електричної мережі. Переваги в збільшенні частки розосередженого генерування можливі лише при обранні правильного методу пошуку оптимальних місць під'єднання та потужності генерування НВДЕ.

Запропонований метод дозволяє визначити оптимальну по втратах активної потужності в мережі величину генерування НВДЕ для досліджуваного вузла схеми, в умовах нормалізації рівнів напруги у вузлах та підвищення якості функціонування електричної мережі для забезпечення потреб споживачів електроенергії.

Список використаних джерел

1. *Буйний Р. О.* Про доцільність використання вітроелектростанцій малої потужності для живлення побутових споживачів / Р. О. Буйний, І. В. Діхтярук // Новини енергетики. – 2011. – № 2. – С. 35-39.

2. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46-53.

3. *Shukla T. N.* Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks / T. N. Shukla, S. P. Singh, K. B. Naik // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2010. – Vol. 2. – № 3. – P. 94-106.

4. *Мельников Н. А.* Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1972. – 232 с.

5. *Лежнюк П. Д.* Функціональна залежність складових втрат потужності у вітках електричної мережі від потужності у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 4. – С. 58-62.

6. *Acharya N.* An analytical approach for DG allocation in primary distribution network / N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulanathan // Electric Power and Energy Systems. – 2006. – Vol. 28. – P. 669-678.

УДК 621.316.11

Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук
П.Ю. Красовский, ассистент
ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ф.П. Шкрабець, д-р техн. наук
П.Ю. Красовський, асистент
ДВНЗ "Національний гірничий університет", м. Дніпропетровськ, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНИХ ЛЕП НА ТЕХНІЧНІ ВТРАТИ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

F.P. Shkrabets, Doctor of Technical Sciences
P.Y. Krasovskiy, assistant
National Mining Universitet, Dnepropetrovsk, Ukraine

ANALYSIS OF OVERHEAD LINES PARAMETERS INFLUENCE ON TECHNICAL POWER LOSSES IN TRANSIT

Проведен анализ структуры технологических потерь электроэнергии с точки зрения оценки влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на значения и возможную при этом динамику технических потерь при транспортировке электроэнергии; рассмотрены характер и степень изменения параметров воздушных линий в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: *воздушные линии электропередач, динамика технических потерь, коррозия алюминия.*

Проведено аналіз структури технологічних втрат електроенергії з погляду оцінювання впливу тривалості й умов експлуатації повітряних ліній електропередачі на значення й можливу при цьому динаміку технічних втрат під час транспортування електроенергії; розглянуто характер і ступінь зміни параметрів повітряних ліній у процесі експлуатації.

Ключові слова: *повітряні лінії електропередач, динаміка технічних втрат, корозія алюмінію.*

The analysis of power losses structure in terms of assessing the impact of the duration and conditions of overhead power lines use on the values and possible technical losses dynamic in the electricity transmission is carried out; the formation and degree of overhead line parameters change during operation is examined.

Key words*: overhead power lines, the dynamics of technical losses, the corrosion of aluminum.*

Постановка проблемы. На фоне происходящих в Украине изменений хозяйственного механизма в энергетике, изменения экономических отношений, проблема снижения потерь электроэнергии в электрических сетях не только не утратила свою актуальность, а, наоборот, выдвинулась в одну из задач обеспечения финансовой стабильности энергоснабжающих организаций.

Опыт энергосистем показывает, что при долгосрочной эксплуатации воздушных линий электропередач потери мощности и электроэнергии в них даже при неизменной

нагрузке возрастают. Одна из причин – изменение конфигурации отдельных участков ЛЭП и в связи с этим изменения значений эквивалентных сопротивлений. Из основных возможных причин изменения продольных сопротивлений ЛЭП можно отметить:

– уменьшение поперечного сечения и увеличение длины проводов, обусловленного их остаточной деформацией вследствие действия ветровых, гололедных и других нагрузок;

– коррозия проводов ЛЭП при влиянии на них разных климатических факторов (в том числе кислотных дождей, влажности, повышенной температуры, солнечной радиации) также приводит к снижению их активного поперечного сечения;

– увеличение удельного сопротивления материала проводов ЛЭП, вызванного изменением их структуры (старением) и остаточной деформацией („наклепом”).

В свою очередь, технические потери электроэнергии при ее транспортировке в распределительных сетях являются основой норматива, определяющего экономически обоснованный технологический расход электроэнергии [1], поэтому точная оценка потерь электроэнергии обеспечивает корректное определение эффективности работы сетевого предприятия и планирование энергосберегающих мероприятий.

Цель статьи показать и проанализировать структуру технологических потерь электроэнергии с точки зрения оценки влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на значения и динамику технических электрических потерь при транспортировке электроэнергии.

Изложение основного материала. В системах электроснабжения при транспортировке электроэнергии технологические потери электроэнергии представляют собой сумму двух составляющих потерь:

– потерь в линиях и оборудовании электрических сетей, обусловленных физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии в соответствии с техническими характеристиками и режимами работы линий и оборудования (технические потери);

– расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций.

В свою очередь, технические потери – сумма трех составляющих потерь в линиях и оборудовании электрических сетей:

– потерь, зависящих от нагрузки электрической сети (нагрузочные потери);

– потерь, зависящих от состава включенного оборудования (условно-постоянные потери);

– потерь, зависящих от погодных условий (потерь на корону).

В общем случае, для воздушных линий электропередачи при передаче электроэнергии от источников к потребителям можно рассматривать нагрузочные потери, потери холостого хода и потери на корону. Нагрузочные потери активной электроэнергии в трехфазной воздушной линии определяются выражением

$$\Delta W_{н} = 3R\int_{0}^{T} I^{2}(t)dt\,, \qquad (1)$$

где R – активное сопротивление провода одной фазы воздушной линии; $I(t)$ – полный ток в линии в течение интервала времени T.

Активные потери холостого хода для воздушных ЛЭП (условно-постоянные потери) определяют по формуле

$$\Delta W_{xx} = \frac{\Delta P_{xx}}{U^{2}_{ном}}\int_{0}^{T} U^{2}(t)dt\,, \qquad (2)$$

где ΔP_{xx} – потери мощности холостого хода линии при номинальном напряжении, которые определяются токами утечки через изоляцию (междуфазную и относительно земли);

$U_{ном}$ – номинальное напряжение в сети, при котором работает линия; $U(t)$ – напряжение в линии в течение интервала времени T.

Определение потерь на корону в воздушных ЛЭП с точки зрения точности является проблематичным, так как они зависят от ряда специфических факторов (метеорологических условий на трассе линии, электрического поля, геометрических параметров, расположения фазных проводов линий электропередач и т. д). Выполнялись исследования с целью уточнения методики расчета потерь мощности и энергии на корону на проводах в равнинных условиях. В [2] представлено обоснование и вывод уравнения потерь активной мощности на корону на основании интегральных характеристик короны и результатов зондовых исследований движения объемного заряда в поле короны переменного тока. Согласно [2], в области общей короны зависимость потерь мощности на один провод от напряжения и параметров ЛЭП выражается формулой

$$\Delta P_{кор} = \omega C^2 \frac{U_м(U_м - U_0)}{2} \cdot \frac{K_1 \cos \varphi_{K1}}{C_{об} - C}, \quad (3)$$

где U_0 – напряжение, соответствующее критическому заряду на поверхности провода; $U_м$ – амплитуда фазного напряжения; C – емкость одной фазы воздушной линии; $C_{об} = \frac{2\pi\varepsilon_0}{ln(r_н / r_п)}$ – емкость объемного заряда; $r_н$ – радиус наружной области, в которой суммарная плотность объемного заряда имеет ненулевое значение; $r_п$ – радиус фазного провода; ε_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха; φ_{K_1} – угол сдвига фаз первой гармоники тока относительно напряжения; $K_1 = Q_1 / Q_{к\,макс}$ – отношение амплитуды первой гармоники к амплитуде компенсированного заряда; ω – угловая частота переменного напряжения.

Произведение $K_1 \cos \varphi_{K_1}$, вычисленное для реальных условий по экспериментальным данным при величине относительного перенапряжения равного 2, имеет значение примерно 0,7. Тогда формула для потерь мощности на корону примет вид

$$\Delta P_{кор} = 0{,}35\omega C^2 U_м (U_м - U_0)/(C_{об} - C). \quad (4)$$

С точки зрения оценки влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на значения и возможную при этом динамику технических электрических потерь при транспортировке электроэнергии, выделим основные технические и физические характеристики воздушных линий, влияющих на нагрузочные потери, потери холостого хода и потери на корону в этих же линиях, и рассмотрим характер и степень изменения параметров воздушных линий в процессе эксплуатации.

Для определения нагрузочных потерь электрической энергии в линиях, учитывая практическую невозможность математически выразить закон изменения тока нагрузки в линии за длительный промежуток времени, можно воспользоваться формулой, учитывающей составляющие передаваемой мощности [1; 2]:

$$\Delta W_н = \Delta P_a \cdot \tau_a + \Delta P_p \cdot \tau_p \quad (5)$$

или

$$\Delta W_н = 3 \cdot K_ф^2 \cdot (I_м \cos\varphi)^2 \cdot R \cdot \tau_a + 3K_ф^2 (I_м \sin\varphi)^2 \cdot R \cdot \tau_p, \quad (6)$$

где ΔP_a – потери активной мощности от передачи активной мощности; ΔP_p – потери активной мощности от передачи реактивной мощности; $\tau_a = (0{,}124 + T_{ма} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760$ – количество часов максимальной нагрузки по активной мощности;

$\tau_p = (0{,}124 + T_{мр} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760$ – количество часов максимальной нагрузки по реактивной мощности; $K_ф$ – коэффициент формы графика нагрузки; $I_м$ – максимальный расчетный ток; $T_{ма}$ – количество часов использования максимальной нагрузки по активной мощности; $T_{мр}$ – количество часов использования максимальной нагрузки по реактивной мощности.

Анализ выражений (1) и (5) показывает, что величиной, относящейся к техническим параметрам воздушной линии и влияющей на значение нагрузочных потерь, является активное сопротивление (продольное) провода одной фазы воздушной линии ***R***. В свою очередь, указанное сопротивление зависит от удельного сопротивления материала проводника ***ρ***, длины линии ***l*** и сечения ***F*** (диаметра ***d***) провода и определяется по известному выражению

$$R = \rho \frac{l}{F} = \rho \frac{l}{\pi d^2 / 4}. \qquad (7)$$

Исходя из последнего выражения, можно констатировать, что для воздушных линий электропередачи в процессе их длительной эксплуатации возможно увеличение активного сопротивления ЛЭП и, соответственно, увеличение нагрузочных потерь за счет уменьшения площади эффективного сечения (и диаметра) фазных проводов воздушных линий за счет коррозионных процессов.

Следует отметить, что активное сопротивление также зависит от температуры:

$$R = R_T \left[1 + \alpha(\Theta_П - 20°)\right], \qquad (8)$$

где R_T – табличное значение сопротивления провода (при температуре 20 ºС); ***α*** – температурный коэффициент, который для проводов типа ***А*** равен 0,004; $\Theta_П$ – реальная температура провода, ºС.

Температура провода определяется тремя факторами: величиной тока, температурой окружающей среды и скоростью ветра. Главным фактором, определяющим температуру провода, является температура окружающей среды. Учет температурного фактора увеличивает точность расчетов приблизительно на 5-10 %. Если нагрузка линии не превышает 70-80 % допустимой по нагреву, то температуру провода при расчетах потерь принимают равной среднегодовой температуре воздуха и, учитывая сезонные колебания температуры в Украине, нагрузочные потери в целом по году практически не зависят от температурных изменений сопротивления проводов воздушных линий электропередачи.

На индуктивное сопротивление воздушной линии оказывают влияние также диаметр провода, магнитная проницаемость провода и частота переменного тока. Значение индуктивного сопротивления одной фазы воздушной линии (из алюминиевого провода) на 1 км (Ом/км) определяется следующей формулой:

$$x_0 = 0{,}1441 g \frac{2D_{ср}}{d} + 0{,}016, \qquad (9)$$

где $D_{ср}$ – среднее геометрическое расстояние между осями проводов: $D_{ср} = \sqrt[3]{D_{1-2} D_{2-3} D_{1-3}}$; D_{1-2}, D_{1-3} *и* D_{2-3} – действительные расстояния между проводами фаз 1, 2, 3; d – фактический внешний диаметр провода.

Из формулы (9) видно, что индуктивное сопротивление зависит только от расстояния между проводами и от их диаметра, причем влияние этих величин незначительно, поскольку они входят в выражение под знаком логарифма. Коррозионные изменения диаметра фазного провода по сравнению с изменениями площади поперечного сечения будут значительно меньшими (фазный проводник многопроволочный), следовательно, влияние указанных изменений на значения индуктивного сопротивления неощутимо.

Кроме того, индуктивное сопротивление не участвует в формировании потерь активной энергии и влияет на величину потерь реактивной энергии и потерю напряжения в ЛЭП.

Потери холостого хода в воздушных линиях, т. е. потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам воздушных линий в соответствии с методикой расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях определяют на основе данных об удельных потерях мощности, приведенных в табл., и о продолжительностях видов погоды в течение расчетного периода.

Таблица

Удельные потери мощности от токов утечки по изоляторам ВЛ

Группа погоды	Потери мощности от токов утечки по изоляторам, кВт/км, на ВЛ напряжением, кВ											
	6	**10**	**15**	**20**	**35**	**60**	**110**	**154**	**220**	**330**	**500**	**750**
1	0,011	0,017	0,025	0,033	0,035	0,044	0,055	0,063	0,069	0,103	0,156	0,235
2	0,094	0,153	0,227	0,302	0,324	0,408	0,510	0,587	0,637	0,953	1,440	2,160
3	0,154	0,255	0,376	0,507	0,543	0,680	0,850	0,978	1,061	1,587	2,400	3,600

По влиянию на токи утечки виды погоды должны объединяться в 3 группы: 1 группа – хорошая погода с влажностью менее 90 %, сухой снег, изморозь, гололед; 2 группа – дождь, мокрый снег, роса, хорошая погода с влажностью 90 % и более; 3 группа – туман.

Потери на корону в высоковольтных линиях напряжением 110…750 кВ обусловлены токами утечки, образующимися при ионизации воздушного пространства вокруг провода. Потери на корону зависят в основном от величины напряжения на линии, сечения проводов, конструкции фазы провода и метеорологических условий на трассе линии.

Анализ большого числа работ, выполненных у нас в стране и за рубежом, посвященных оценке, измерению, расчету и анализу потерь на корону позволяет сделать заключение о том, что приводимые в литературных источниках формулы для расчета потерь на корону дают их приближенную оценку [2], прямые измерения этих потерь на действующих линиях требуют применения специализированного оборудования и измерительных устройств, сопряжены с большими затратами материальных средств и организационных усилий.

На практике потери электроэнергии на корону определяют на основе данных об удельных потерях мощности и о продолжительностях видов погоды в течение расчетного периода. При этом к периодам хорошей погоды (для целей расчета потерь на корону) относят погоду с влажностью менее 100 % и гололед; к периодам влажной погоды – дождь, мокрый снег, туман. Выполненный анализ показывает, что отмеченные удельные потери мощности на корону практически не зависят от физических параметров фазных токоведущих проводников, так как, во-первых, радиус фазного провода участвует в формуле для определения потерь под знаком логарифма и его динамика (например, от коррозии) практически не ощутима; во-вторых, в сетях напряжением 110 кВ и более применяют расщепление фазных проводов и в расчетах участвует эквивалентный радиус, что практически исключает возможность учета коррозионных изменений физических параметров проводников воздушных линий.

Выводы

1. На значения потерь холостого хода и потерь на корону в воздушных линиях эксплуатационные (в течение срока эксплуатации) изменения параметров самих линий (конструкция и характеристики проводов) сколько-нибудь заметного влияния не оказывают.

2. Основные изменения с течением времени возможны в уровнях нагрузочных потерь за счет динамики активных сопротивлений проводов воздушных линий от действия коррозионных процессов.

3. Длительная эксплуатация воздушных ЛЭП сопряжена с уменьшением диаметра проводов линий и, соответственно, увеличением удельного сопротивления проводов, что, в свою очередь, является причиной увеличения тепловых потерь в стационарных воздушных сетях с нарастанием срока эксплуатации.

Список использованных источников

1. *Воротницкий В. Э.* Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях : учебно-методическое пособие / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина. – 3-е изд. – М. : ИПК госслужбы, 2003. – 64 с.

2. *К вопросу* уточнения расчета потерь мощности на корону в высокогорных воздушных линиях электропередачи / Л. В. Егиазарян, В. С. Сафарян, Л. О. Караханян и др. // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2010. – Т. 63, № 1. – С. 63-69.

УДК 621.311

О.С. Яндульський, д-р техн. наук
В.В. Мацейко, аспірант
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМ ЗАСОБАМИ СИСТЕМ ГНУЧКИХ ПЕРЕДАЧ ЗМІННОГО СТРУМУ

А.С. Яндульский, д-р техн. наук
В.В. Мацейко, аспирант
НТУУ «КПИ», м. Киев, Украина

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ СРЕДСТВАМИ СИСТЕМ ГИБКИХ ПЕРЕДАЧ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

O.S. Yandulskyi, Doctor of Technical Sciences
V.V. Matseiko, post-graduate student
National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine

IMPROVING THE QUALITY OF POWER SYSTEMS BY MEANS OF FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS

Проаналізовано світовий досвід впровадження систем гнучких передач змінного струму для підвищення ефективності управління енергосистемами. Узагальнені функціональні можливості та лідери на світовому ринку цих пристроїв. Розглянута необхідність інтеграції систем ГПЗС в ОЕС України з метою вирішення проблем та недоліків, які притаманні їй на цьому етапі розвитку. Розроблена автоматична система керування тиристорною установкою поздовжньої компенсації, проведено моделювання та аналіз впливу ТУПК на підвищення пропускної здатності ліній електропередач та здійснення ефективного демпфірування низькочастотних коливань.

Ключові слова: *гнучкі системи передачі змінного струму, статичний тиристорний компенсатор, тиристорна установка поздовжньої компенсації, система керування, моделювання.*

Проанализирован мировой опыт внедрения систем гибких передач переменного тока для повышения эффективности управления энергосистемами. Обобщены функциональные возможности и лидеры на мировом рынке данных устройств. Рассмотрена необходимость интеграции систем ГПЗС в ОЭС Украины с целью решения проблем и недостатков, которые присущие на данном этапе развития. Разработана автоматическая система управления тиристорной установкой продольной компенсации, проведено моделирование и анализ влияния ТУПК на повышение пропускной способности линий электропередач и осуществления эффективного демпфирования низкочастотных колебаний.

Ключевые слова: *гибкие системы передачи переменного тока, статический тиристорный компенсатор, тиристорная установка продольной компенсации, система управления, моделирование.*

Flexible AC transmission systems (FACTS) controllers have been mainly used for solving various power system steady state control problems. The world's literature shows an increasing interest in this subject for the last two decades, where the enhancement of system stability using FACTS controllers has been extensively investigated. Some of the utility experience, real-world installations, and semiconductor technology development have been reviewed and summarized. The control scheme of a typical Thyristor Controlled Series Capacitor controller is described. The results of applying the proposed TCSC controller design for optimal power flow and increase the system damping for low frequency oscillation sareanalyzed.

Key words: *kexible aternative current transmission systems, static var compensator, thyristor controlled series capacitor, control system, modeling.*

Постановка проблеми. Сучасний стан енергетики України характеризується поступовим впровадженням організаційно-технічних заходів, спрямованих на модерніза-

цію, економічний та технологічний розвиток, але багато проблем досі стоїть у черзі на першочергове вирішення [1]:

- незбалансованість структури генеруючих потужностей, нестача ресурсів для ефективного регулювання потужності та частоти;
- спрацьованість і технічна застарілість обладнання;
- неефективне використання пропускної здатності електричної мережі;
- недостатні обсяги засобів регулювання напруги та компенсації реактивної потужності;
- недостатній рівень оснащеності засобами телемеханіки, релейного захисту та автоматики, моніторингу та діагностики.

У таких умовах можливість реалізації паралельної роботи об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України з об'єднанням європейських країн потребує впровадження новітніх технічних засобів підвищення ефективності управління, що допоможе забезпечити відповідність ЕС нашої держави вимогам асоціації ENTSO_E.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтенсивний технологічний розвиток сучасних енергосистем (ЕС) світу характеризується швидкими темпами впровадження в їх експлуатацію систем гнучкої передачі змінним струмом, систем інтелектуальних мереж та систем моніторингу перехідних режимів. Ці технології вже стали невід'ємною частиною та запорукою ефективної роботи багатьох енергосистем (ЕС) світу.

Зокрема, системи гнучкої передачі змінним струмом (ГПЗС) є одним з пріоритетних напрямків підвищення ефективності систем управління. Такі системи забезпечують адаптивне регулювання основних параметрів передачі змінного струму, чим домагаються найкращих характеристик передачі потужності в темпі "реального процесу" та, відповідно, підвищують керованість і надійність систем.

Дослідження систем ГПЗС було розпочато ще в 90-х роках минулого століття в США зі створення першого покоління пристроїв компенсації, які базувалися на принципах поздовжньої та поперечної компенсації реактивних параметрів передачі з застосуванням швидкодіючих тиристорних ключів.

З того часу дослідження та розроблення стали широкомасштабними, розвиток електронної техніки дозволив створити сучасні швидкодіючі пристрої трьох класів: системи поздовжньої компенсації, системи поперечної компенсації і комплексні системи, що поєднують в одному пристрої поздовжню і поперечну компенсацію, які активно використовуються в ЕС різних країн (ЕС Швеції, Бразилії, Латинської Америки, Індії, Китаю, Канади та ін.) [2].

Лідерами на світовому ринку приладів ГПЗС є компанії Siemens, ABB, Areva, General Electric, серед яких компанія ABB займає провідне місце у розгортанні статичних тиристорних компенсаторів (СТК) та постачає 55 % від загальної кількості, з яких 13 % – встановлені в азіатських країнах. До того ж потрібно зазначити, що СТК є найбільш поширеним по встановленню пристроєм класу паралельної компенсації та систем ГПЗС у цілому. Серед класу поздовжньої компенсації однією з найбільш поширених є тиристорна установка поздовжньої компенсації (ТУПК), яка вперше була розроблена та введена в експлуатацію компанією ABB в 1992 році.

Закордонний досвід використання систем ГПЗС показав можливість надання ЕС властивостей гнучкості та вирішення таких завдань [3]:

– збільшення ефективності використання існуючих ліній електропередач (ЛЕП) та, відповідно, відмова від коштовного мережевого будівництва (нових ЛЕП);
– підвищення надійності електропостачання споживачів;
– демпфірування коливань у системах;
– стабілізація напруги у вузлах ЕС.

Збільшення пропускної здатності існуючих ЛЕП за рахунок використання систем ГПЗС, у свою чергу, дозволяє:

- підвищити статичну та динамічну стійкість ЕС;
- оптимізувати навантаження паралельними лініями зв'язку;
- зменшити втрати активної потужності за рахунок зміни потокорозподілу паралельних ділянок мережі.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Впровадження систем ГПЗС в об'єднану енергосистему (ОЕС) України на сьогодні є стратегічним напрямком досліджень вітчизняних науково-дослідних установ та організацій. Багато робіт українських фахівців направлені на дослідження ефективності впровадження систем СТК в ОЕС України [4], результати яких наочно відображають переваги застосування цих пристроїв та рекомендації щодо їх встановлення. Питання інтеграції ТУПК в ЕС ОЕС України також висвітлено в деяких роботах, але досліджень у цьому напрямку значно менше. Особливий інтерес становить вплив встановлених ТУПК на збільшення перетоків активної потужності міжсистемних зв'язків, що, в свою чергу, забезпечить передачу додаткової електроенергії з надлишкових енергосистем і стане альтернативою введення нових генеруючих потужностей та будівництва високовольтних ліній електропередачі (ЛЕП) з метою збільшення пропускної здатності електричних мереж. Демпфірування низькочастотних коливань є також досить актуальним питанням та є постійною темою для обговорення на конференціях і семінарах, що вказує на необхідність пошуку нових підходів і методів по дослідженню забезпечення стійкості ЕС в умовах виникнення небезпечних коливних порушень.

Проведені дослідження та оброблення синхронізованих вимірів потужності та частоти від реєстраторів системи моніторингу перехідних режимів, які встановлені на головних об'єктах ОЕС України, по основним внутрішнім перетинам ОЕС вказує на появу декількох домінуючих низькочастотних коливань при виникненні значних збурень у системоутворюючій мережі ОЕС України (наприклад, при вимкненні блоку 1000 МВт на одній з атомних електростанцій), які знаходяться в межах 0,1-1 Гц. Це підтверджує необхідність впровадження відповідних технічних засобів для демпфірування низькочастотних коливань, особливо на "слабких" перетинах, де такі коливання особливо небезпечні з погляду порушення стійкості.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є моделювання та аналіз впливу засобів систем гнучких передач змінним струмом, а саме тиристорної установки поздовжньої компенсації, на збільшення пропускної здатності електричної мережі та забезпечення необхідного демпфірування коливань потужності по лініям електропередач при виникненні збурення в електричній мережі.

Виклад основного матеріалу. ТУПК являє собою ємнісний компенсатор, який включає поздовжню батарею конденсаторів, що шпунтуються тиристорно-керованим реактором з метою плавного регулювання реактивного опору. Для визначення впливу ТУПК на підвищення пропускної здатності ЛЕП та можливості демпфувань коливань перетоків потужності в програмному середовищі Power Factory фірми DigSilent виконано моделювання роботи цього пристрою на прикладі тестової схеми ЕС Інституту інженерів з електротехніки та електроніки. Тестова схема ЕС Інституту інженерів з електротехніки та електроніки зі встановленим ТУПК наведена на рис. 1.

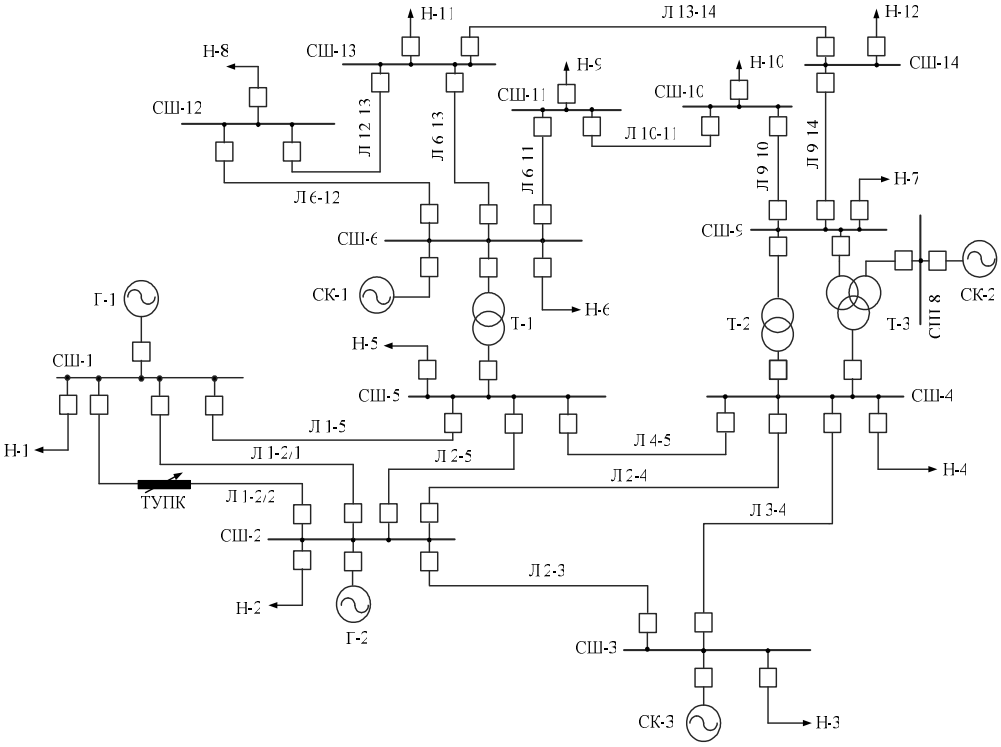


Рис. 1. Тестова схема Інституту інженерів з електротехніки та електроніки зі встановленим ТУПК

Була розроблена автоматична система керування тиристорною установкою поздовжньої компенсації відповідно до [5]. Типовий модуль ТУПК складається з двох основних операційних блоків зовнішнього та внутрішнього контролів. Функція зовнішнього контролю полягає в управлінні контролером для досягнення необхідного рівня компенсації, який безпосередньо опирається на виміряні параметри системи. Функція внутрішнього контролю полягає в забезпеченні необхідного рівня відкриття тиристорного клапана для забезпечення бажаної компенсації реактивного опору. Загальна блок-схема моделі ТУПК та структура зовнішнього управління представлені на рис. 2, а передаточна функція контуру управління стійкістю – на рис. 3.

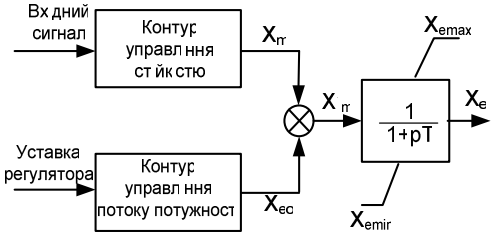


Рис. 2. Блок-схема моделі ТУПК для аналізу стійкості

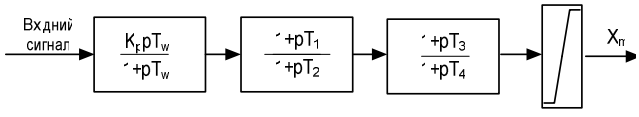


Рис. 3. Передаточна функція контуру управління стійкістю

Контур управління стійкістю включає в себе блок підсилення, ізодромний фільтр, динамічний компенсатор та обмежувач. Ізодромний фільтр необхідний для того, щоб уникнути реакції контролера на зсув постійної складової вхідного сигналу. Динамічний компенсатор складається з двох (або більше) аперіодичних ланок, які залежно від відношення відповідних постійних часу вносять випередження або запізнення в сигнал.

Обмежувач використовується для покращення роботи контролера при великих відхиленнях вхідного сигналу. В загальному передаточна функція цього контуру має вигляд:

$$H(p) = K_p \cdot \frac{pT_w}{1+pT_w} \cdot \frac{1+pT_1}{1+pT_2} \cdot \frac{1+pT_3}{1+pT_4} = K_p \cdot H_1(p), \quad (1)$$

де K_p – позитивний коефіцієнт підсилення; $_{H_1(p)}$ – передаточна функція блоку стабілізації; $_{T_w}$ – постійна часу форсування; T_1, T_3 та T_2, T_4 – постійні часу випередження та запізнення відповідно.

Згідно з [5] вхідним сигналом контуру управління стійкістю теоретично можуть бути активна потужність лінії, реактивна потужність лінії, величина струму лінії та величини напруг на шинах, але світовий досвід побудови систем управління ТУПК показав, що саме активна потужність та струм є найбільш придатними для цієї ролі. Тому для системи керування ТУПК у програмному середовищі Power Factory для початкових дослідів як вхідний сигнал була обрана активна потужність. У перспективі повинне бути дослідження використання як вхідного сигналу контуру управління стійкістю величини струму лінії та порівняння такого варіанта роботи моделі ТУПК з представленим.

Моделювання режиму тестової ЕС виконаний для випадку збільшення споживання активної потужності на вузловій СШ-2 на 100 % при вимкненій та ввімкненій тиристорній установці поздовжньої компенсації в ЛЕП 1-2/2. Результати досліджень наведені на рис. 4 для перетоку активної потужності по ЛЕП 1-2/2.

Аналіз отриманих результатів зміни активної потужності по ЛЕП 1-2/2, де встановлено пристрій поздовжньої компенсації, свідчить про збільшення перетоку активної потужності цієї ЛЕП на 20 % при використанні ТУПК з запропонованою моделлю регулятора. Також, як видно з рис. 4, використання ТУПК сприяє зменшенню динамічних відхилень та числа коливань перетоку активної потужності, чим забезпечує демпфірування коливань у перехідних режимах. Це особливо актуально в умовах завантажених ЛЕП, коли додаткове збільшення перетоку активної потужності може призвести до порушення паралельної роботи ЕС.

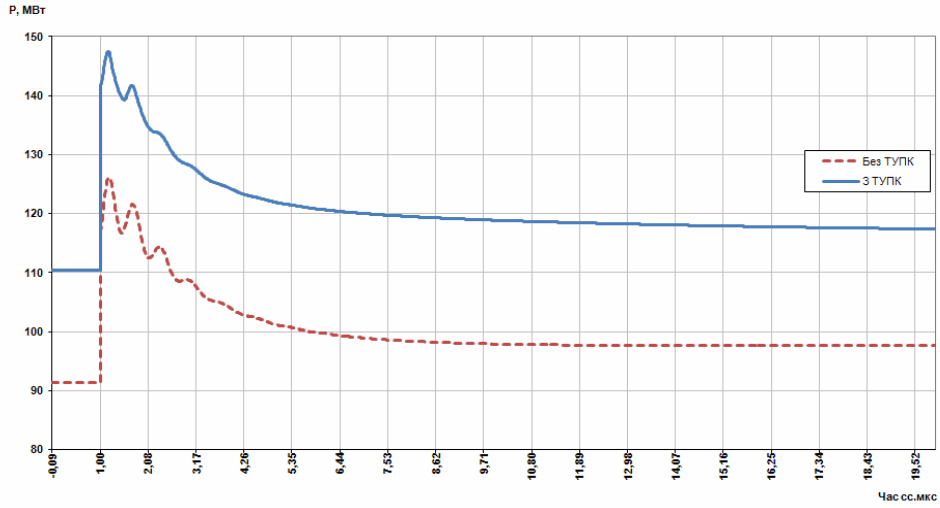


Рис. 4. Зміна перетоку активної потужності по ЛЕП 1-2/2 при збільшенні споживання активної потужності на СШ-2 на 100 %

Висновки і пропозиції. Таким чином, гнучке регулювання параметрів режиму, а саме гнучка зміна у часі реактивного опору, яке здійснюється за допомогою встановленого ТУПК, дозволяє підвищити якість роботи представленої ЕС через збільшення пропускної здатності та забезпеченням демпфірування коливань потужності по ЛЕП.

Враховуючи особливості та вже зазначені проблеми ОЕС України, необхідно зазначити, що впровадження систем гнучких передач змінним струмом дозволить вирішити чимало першочергових завдань та відповідати вимогам європейської системи щодо здійснення ефективного демпфірування коливань потужності. В свою чергу, це вимагає додатково розроблення методики оцінювання техніко-економічної ефективності засто-

сування пристроїв ГПЗС, необхідної для коректного прийняття та обґрунтування рішень щодо місць встановлення пристроїв та їх характеристик.

Список використаних джерел

1. *Кириленко О. В.* Проблеми з забезпечення надійної роботи ОЕС України в умовах реформування енергетики / О. В. Кириленко // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Ч. 1. – С. 135-141.

2. *Grunbaum R.* FACTS for enhancing the reliability of power transmissions grids [Electronic resource] / R. Grunbaum, P. Jones, B. Richardson // ABB Power Technologies AB, Sweden, 2005. – Access mode : http://www.abb.com.

3. *Laszlo Gyugyi,* Narain G. Hingorani, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – Wiley-IEEE Press, 1999. – 452 p.

4. *Підвищення* пропускної здатності «слабких» перетинів енергосистем з використанням технології ГПЗС (FACTS) / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, В. В. Павловський, А. В. Левконюк // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 63-68.

5. *Paserba J. A* Thyristor ControlledSeries Compensation Model for Power System Stability Analysis / J. Paserba, N. Miller, E. Larsen and R. Piwko // IEEE Trans. Power Systems. – Vol. 10. – No. 4. – November 1995. – P. 1471-1478.

УДК 621.311

В.А. Баженов, канд. техн. наук
В.М. Сулейманов, канд. техн. наук
Т.Л. Кацадзе, канд. техн. наук
Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

В.А. Баженов, канд. техн. наук
В.М. Сулейманов, канд. техн. наук
Т.Л. Кацадзе, канд. техн. наук
Национальный технический университет “КПИ”, г. Киев, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

V.A. Bazhenov, Candidate of Technical Sciences
T.M. Suleimanov, Candidate of Technical Sciences
T.L. Katsadze, Candidate of Technical Sciences
National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine

FORMATION OF DESIGN SOLUTIONS FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS

Проведено аналіз діючої методики техніко-економічного обґрунтування проектних рішень з перспективного розвитку електроенергетичних систем. Показано потенційні загрози, спрямовані на зниження якості прийнятих проектних рішень, серед яких – недостатня об'єктивність економічних критеріїв ефективності технічних рішень, штучне обмеження простору пошуку на попередньому етапі відбору можливих рішень. Представлено математичні моделі та метод формування і техніко-економічного обґрунтування проектних рішень з перспективного розвитку електроенергетичних систем на основі математичного апарату генетичних алгоритмів. Показано, що пропонований підхід забезпечує стійку збіжність процесу пошуку за прийнятну кількість кроків без штучного обмеження простору пошуку і використання додаткової експертної інформації щодо доцільності можливих проектних рішень.

Ключові слова: *електроенергетична система, прийняття проектних рішень, оптимізація, техніко-економічне обґрунтування, інтелектуальний пошук, генетичний алгоритм.*

Проведен анализ действующей методики технико-экономического обоснования проектных решений по перспективному развитию электроэнергетических систем. Показаны потенциальные угрозы, направленные на снижение качества принимаемых проектных решений, среди которых – недостаточная объективность экономических критериев эффективности технических решений, искусственное ограничение пространства поиска на предварительном этапе отбора возможных решений. Представлены математические модели и метод формирования и технико-экономического обоснования принятия проектных решений по перспективному развитию электроэнергетических систем на основе математического аппарата генетических алгоритмов. Показано, что предлагаемый подход обеспечивает устойчивую сходимость

процесса поиска за приемлемое количество шагов без искусственного ограничения пространства поиска и использования дополнительной экспертной информации о целесообразности возможных проектных решений.

Ключевые слова: *электроэнергетическая система, принятия проектных решений, оптимизация, технико-экономическое обоснование, интеллектуальный поиск, генетический алгоритм.*

The paper analyzes existing technique feasibility of design decisions on long-term development of electric power systems. Showing the potential threats to reduce the quality of the design decisions, among them – the lack of objective economic criteria of efficiency of technical solutions, the artificial restriction of the search space at the preliminary stage of the selection of possible solutions. The paper presents the mathematical model and method of formation and feasibility making design decisions concerning future development of electric power systems based on mathematical apparatus of genetic algorithms. It is shown that the proposed approach provides a stable convergence of the search process in a reasonable amount of steps without artificial restrictions of the search space and without use of additional expert information on the feasibility of possible design solutions.

Key words: *power system, making design decisions, optimization, feasibility study, intelligent search, genetic algorithm.*

Вступ. Ефективність функціонування систем виробництва, передачі та розподілу електричної енергії багато в чому визначається конструкторськими рішеннями, які були використані у процесі формування електричних мереж і систем. Взагалі, завдання проектування розвитку електроенергетичних систем та електричних мереж полягає у розробленні й економічному обґрунтуванні технічних рішень, що забезпечують надійне та якісне енергопостачання споживачів електричної енергії з урахуванням усіх технічних, технологічних, екологічних, соціальних та інших обмежень. При цьому суть техніко-економічного обґрунтування конструкторського рішення полягає у вирішенні оптимізаційної задачі мінімізації функції економічної ефективності, наприклад, зведених дисконтованих витрат, серед можливих альтернативних варіантів проектних рішень [1-3].

Слід зазначити, що економічні показники ефективності проектних рішень в енергетичній галузі є об’єктивізованими і не забезпечують у повному обсязі всебічне оцінювання альтернативних варіантів конструкторських рішень. У першу чергу, це пояснюється багатофакторністю критеріального простору пошуку. Тут вибір найбільш ефективного варіанта розвитку електроенергетичної системи часто пов'язаний з необхідністю врахування взаємоконфліктних, а іноді і непорівнянних факторів [4; 5]. У сучасних моделях техніко-економічного обґрунтування проектних рішень, зазвичай, використовують непрямі показники якості, надійності та екологічності функціонування об'єктів електричних мереж. Це дозволяє реалізувати масштабування різних функціональних показників і побудувати функцію зведених дисконтованих витрат, яка полягає у мінімізації з метою пошуку найбільш ефективного вирішення [5-7]. Разом з тим у сучасних умовах реформування ринку електричної енергії України, особливо з урахуванням монополізації енергетичного виробництва, впливу фінансово-економічних криз банківських систем та деяких інших факторів, такі показники не забезпечують об'єктивності оцінювання пропонованих технічних рішень.

Крім того, традиційні методи багатовимірної оптимізації, які використовують у задачах техніко-економічного обґрунтування, є методами локального пошуку, їх ефективність істотно залежить від вибору початкової точки пошуку, а самі методи накладають додаткові обмеження на властивості цільової функції [8]. Окрему увагу слід приділити ще одному фактору, який несе потенційну загрозу погіршення якості проектних рішень в енергетичній сфері. Справа в тому, що рішення задачі мінімізації функції економічної ефективності на попередньому етапі передбачає генерацію декількох можливих альтернативних проектних рішень. Тут вибір найбільш ефективного варіанта розвитку електроенергетичної системи часто може виявитися обмеженим недостатнім досвідом проектувальника або «закостенілістю» його мислення, коли нетипове рішення, що забезпечує мінімум оціночної функції, не буде їм виявлено ще на попередньому етапі і, отже, не буде включено до складу рішень, які будуть зіставлятися.

Тут, на нашу думку, досить ефективним може виявитися підхід до формування можливих проектних рішень, заснований на математичному апараті генетичних алгоритмів.

Основна ідея методу. Задачу прийняття проектного рішення щодо вибору оптимального шляху розвитку електроенергетичної системи в загальному випадку можна предста-

вити як задачу пошуку оптимального (або прийнятного) рішення в багатофакторному просторі станів. Тут використання моделей інтелектуального пошуку [9]. Методи неінформативного (сліпого) пошуку гарантують визначення оптимального рішення поставленої задачі тільки після повного перебору і порівняння всіх можливих проектних рішень. Однак внаслідок високої розмірності багатофакторного простору пошуку використання таких методів часто пов'язано з проблемою комбінаторного вибуху і в реальних умовах проектування не може бути реалізоване. Інша група евристичних методів базується на штучному обмеженні простору пошуку і подальшому зіставленні економічної ефективності обмеженого обсягу альтернативних проектних рішень. Як вже зазначалося вище, «слабкою ланкою» у використанні евристичних методів пошуку є людський фактор, коли брак практичного досвіду особи, що приймає проектне рішення, приводить до того, що найбільш ефективне і перспективне рішення може бути відкинуто ним ще на попередньому етапі штучного обмеження простору пошуку.

Генетичні алгоритми, пропоновані авторами для вирішення проектних задач у багатофакторному просторі пошуку [8; 10-13], значною мірою позбавлені зазначених недоліків. Основна ідея пропонованого підходу полягає у представленні характеристик і властивостей можливих проектних рішень за допомогою двійкового коду та формуванні вектора, що містить бінарні ланцюжки властивостей варіанта проектного рішення. Очевидно, що такий вектор певною мірою відповідає спрощеній математичній моделі генотипу біологічного організму, який містить повну інформацію про цей організм. Вказана обставина дозволяє застосувати основні генетичні операції схрещування, що буде приводити до формування нових проектних рішень з новими властивостями.

Тут формується оцінювальна функція, обумовлена параметрами проектних рішень, яка відповідає оцінці пристосовності біологічного організму до умов навколишнього середовища. Формування можливих проектних рішень здійснюється циклічно, на підставі попередніх поколінь, з використанням генетичних операцій кросинговеру (схрещування), інверсії і мутації, застосовуваних випадковим чином за стохастичними законами. При цьому пріоритет під час схрещування мають проектні рішення, які характеризуються найвищими значеннями оціночної функції ефективності, що гарантує поступове поліпшення якості проектних рішень.

Використання генетичних алгоритмів пошуку гарантує розгляд різноманітних, часто вже не типових рішень проектних задач [8; 10-13], що є основною перевагою пропонованого авторами підходу. Вкажемо також ще на деякі додаткові позитивні якості методів генетичного пошуку [8]:

1) простота та прозорість реалізації;
2) можливість розпаралелювання процесу пошуку;
3) простота кодування та декодування інформації;
4) знижена ймовірність зациклювання процесу пошуку в локальних оптимумах.

Разом з тим використання генетичних алгоритмів пошуку оптимального проектного рішення пов'язано з такими вадами методів, які необхідно враховувати у процесі вирішення практичних задач:

1) висока ітеративність алгоритмів;
2) суттєва залежність ефективності генетичного пошуку від його параметрів;
3) висока ймовірність передчасної збіжності циклічного пошуку.

Математичні моделі методу. Рішення задач прийняття проектних рішень з використанням апарату генетичних алгоритмів полягає у послідовному виконанні таких основних процедур [8; 10-13].

1. Визначення складу обмежень, що визначають прагматичні аспекти функціонування проектованої технічної системи і формування складу ознак, характеристик і вла-

стивостей, які дозволяють персоніфікувати відмінності між породжуваними проектними рішеннями.

2. Визначення способу кодування генетичної інформації, що визначає характеристики конкретного проектного рішення. Тут кожен атрибут об'єкта проектування кодують бітовим бінарним ланцюжком (вектором) – хромосомою:

$$h = \frac{x - \min}{(\max - \min)(2^n - 1)},$$

де x – числове значення параметра об’єкта проектування у форматі з плаваючою комою; min, max – мінімальне та максимальне значення параметра відповідно; n – довжина хромосоми, тобто кількість біт бінарного вектора для зберігання закодованого атрибутивного параметра.

Об'єднання всіх хромосом, які визначають властивості проектного рішення, утворює геном, що містить всю генетичну інформацію в цілому. Тут для формування бінарних ланцюжків, зазвичай, використовують код Грея, який забезпечує одиничну відстань Хеммінга між суміжними значеннями параметрів проектних рішень, що гарантує відсутність породження «глухих кутів» у пошуковому процесі [11].

3. Формування оціночної фітнес-функції, яка визначає доцільність і ефективність породжуваних проектних рішень

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_m),$$

де x_1, x_2, …, x_m – варійовані параметри, що визначають конкретне проектне рішення.

Як оціночна, може бути використана функція зведених дисконтова них витрат, яка визначає економічну ефективність проектного рішення [5], функція сумарних втрат потужності або витрат умовного палива на електростанціях тощо. Раніше ми зазначали, що прийняті у проектній практиці економічні критерії ефективності проектних рішень є об'єктивізованими і не відображають повною мірою оцінку доцільності пропонованого рішення. Тут, на думку авторів, можуть бути використані інші критерії ефективності проектних рішень, що моделюють, наприклад, вербальні оцінки якості породжуваних проектних рішень і побудовані з використанням апарату нечіткої логіки [9; 12].

4. Визначення складу початкової популяції проектних рішень та заповнення за допомогою генератора випадкових чисел їх генотипів.

5. Розрахунок значень фітнес-функції ефективності проектних рішень поточного покоління, а також середнього значення фітнес-функції всієї популяції. Тут також розглядають питання щодо досягнення збіжності генетичного алгоритму. Подальші процедури виконують у разі відсутності збіжності.

6. Селекція генетичного матеріалу спрямована на відбір проектних рішень, які характеризуються найвищими значеннями фітнес-функції. У результаті виконання операції селекції формують батьківські пари проектних рішень. При цьому пріоритет мають проектні рішення, які характеризуються найвищими значеннями фітнес-функції.

7. Реалізація операції кросинговеру, яка полягає у схрещуванні інформаційних ланцюжків генетичного матеріалу всіх батьківських пар і формуванні дочірніх проектних рішень, які успадковують характеристики обох «батьків». Тут випадковим чином визначається тип кросинговеру та точки розриву геномів і формується дочірній генотип.

8. Реалізація операції мутації, яка полягає у випадковій зміні генотипу дочірніх елементів, визначених на попередньому етапі виконання алгоритму. Тут випадковим чином визначається тип мутації (проста мутація або інверсія). У випадку простої мутації випадково визначається ген, який змінює своє бінарне значення на протилежне. Інверсія, у свою чергу, полягає у випадковому визначенні двох точок розриву і «перевертанні» частини геному дочірнього елемента між цими точками.

9. Визначення випадковим чином елемента популяції, який замінить утворений дочірній генотип у наступному поколінні. Тут пріоритет до заміщення мають проектні рішення, що характеризуються найменшими значеннями фітнес-функції.

Далі управління передають процедурі 5 для виконання чергового кроку генетичного алгоритму та формування нового покоління можливих проектних рішень.

Зазначимо, що розглянутий алгоритм не є єдиноможливим, часто використовують різні його модифікації, наприклад, на етапі виконання селекції, склад батьківських пар можна визначати завдяки відкиданню найбільш неефективних рішень або методом організації турнірів.

Істотною проблемою, пов'язаної з використанням генетичних алгоритмів у задачах оптимізації проектних рішень розвитку електроенергетичних систем, є налагодження алгоритму. Тут вибору підлягають такі характеристики алгоритму, як: кількість елементів початкової популяції; тривалість життєвого циклу елементів; спосіб формування батьківських пар на кожному етапі роботи алгоритму; визначення ймовірнісних налаштувань операцій кросинговеру і мутацій тощо. Задача налаштування генетичного алгоритму є багатофакторною і не має типового однозначного розв’язку. Так, наприклад, знижене значення обсягу популяції характеризується недостатньою різноманітністю генотипів і може привести до передчасної збіжності алгоритму до локального оптимуму, який не відповідає точному розв’язку задачі оптимізації. Навпаки, надмірно завищена кількість елементів популяції часто приводить до неефективного схрещування неперспективних рішень, що ускладнює та істотно уповільнює збіжність алгоритму. Схожа ситуація спостерігається і з налаштуванням характеристик мутацій. Основне призначення мутацій тут полягає у забезпеченні достатньої різноманітності генотипів, що дозволяє вивести процес пошуку з локальних оптимумів багатофакторного простору. Тому недостатня інтенсивність мутацій не забезпечує необхідної різноманітності генотипів. Навпаки, надмірне захоплення мутаціями під час виконання генетичних алгоритмів може погіршити якісні характеристики породжуваних проектних рішень та суттєво загальмувати процес еволюції.

На думку авторів, для налаштування генетичних алгоритмів пошуку ефективного проектного рішення розвитку електроенергетичних систем корисним може виявитися апарат нечіткої логіки, що забезпечує «тонке» налаштування алгоритму в багатовимірному просторі регулювання [9; 12].

Приклад реалізації генетичного алгоритму. Розглянемо застосування генетичного алгоритму на прикладі розв’язання транспортної задачі забезпечення живлення споживачів деякого району. На рис. 1 представлено надлишкову схему електричної мережі, що забезпечує живлення споживачів у пунктах 1, 2 і 3 від електростанції, розташованої в пункті 0. На схемі вказані також навантаження споживачів у мегаватах і відстані між підстанціями в кілометрах. Розв’язання задачі полягає у виборі мінімальної оптимальної конфігурації електричної мережі та визначенні перерізів проводів на ділянках схеми.

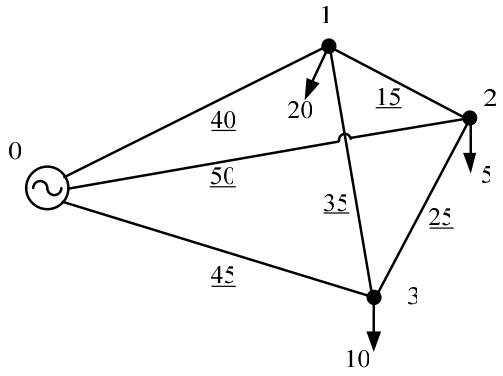


Рис. 1. Надлишкова схема електричної мережі

Інформаційний генетичний ланцюжок проектованої електричної мережі складається з шести ділянок – хромосом, кожна з яких несе інформацію про конструктивне виконання відповідної лінії електропередачі. Під конструктивним виконанням лінії будемо розуміти марку і переріз проводів на відповідній ділянці мережі. Як показано в табл. 1, така інформація може бути представлена одним із восьми можливих значень. Тут коду «000» відповідає відсутність лінії електропередач на відповідній ділянці між підстанціями. Як випливає з табл. 1, для подання генетичної інформації кожної хромосоми необхідно 3 біта, а для всього генома – 18 біт, що визначає простір пошуку з 2^{18} можливих рішень.

Таблиця 1

Кодування інформаційного змісту хромосом

№ п/п	Марка проводу	Індекс	Код Грея
1	–	0	000
2	АС 70/11	1	001
3	АС 95/16	2	011
4	АС 120/19	3	010
5	АС 150/24	4	110
6	АС 185/29	5	111
7	АС 240/32	6	101
8	2×АС 240/32	7	100

Ефективність проектного рішення будемо оцінювати за величиною сумарних зведених дисконтованих витрат на спорудження електричної мережі та покриття втрат потужності на передачу електричної енергії по лініях. Для спрощення задачі та підвищення її наочності будемо нехтувати витратами на експлуатацію лінії, а також постійної складової втрат. Таким чином, оцінна функція оптимальності пропонованого рішення має вигляд

$$F = \sum_{i=1}^{6} З_{0i} l_i = \sum_{i=1}^{6} \left(K_{0i} E + I_i^2 r_{0i} \tau C \right) l_i ,$$

де $З_{0i}$ – погонні значення зведених дисконтованих витрат; K_{0i} – погонні значення капіталовкладень у будівництво ліній електропередач; E – норма дисконту; I_i – робочий струм у лінії в режимі максимальних навантажень; r_{0i} – погонні активні опори ліній електропередач; τ – час максимальних втрат; C – тариф на покриття втрат потужності в електричній мережі; l_i – довжина ліній електропередач.Тут для кожного можливого конструктивного виконання ділянок електричної мережі зведені дисконтовані витрати визначаються поліномами:

$$З_{70} = \left(27,5 + 0,015 I_{\text{р}}^2\right) l; \qquad З_{95} = \left(28,5 + 0,011 I_{\text{р}}^2\right) l;$$

$$З_{120} = \left(29,5 + 8,78 \cdot 10^{-3} I_{\text{р}}^2\right) l; \quad З_{150} = \left(31 + 7,34 \cdot 10^{-3} I_{\text{р}}^2\right) l;$$

$$З_{185} = \left(32,5 + 5,72 \cdot 10^{-3} I_{\text{р}}^2\right) l; \quad З_{240} = \left(35 + 4,25 \cdot 10^{-3} I_{\text{р}}^2\right) l;$$

$$З_{2\times240} = \left(50 + 2,12 \cdot 10^{-3} I_{\text{р}}^2\right) l,$$

де індекси означають переріз проводів на ділянках електричної мережі.

Для організації генетичного пошуку за допомогою генератора випадкових чисел формуємо початкову популяцію, наприклад, з 10 випадкових рішень:

553614 113331 464064 125075 700375

751327 424111 354451 656110 532560

Тут використано восьмеричну систему кодування конструктивного виконання ділянок електричної мережі відповідно до даних табл. 1.

Для кожного з елементів початкової популяції розраховуємо значення фітнес-функції (табл. 2) та визначаємо склад батьківських пар для виконання операцій кросинговеру. Тут у визначенні батьківських пар пріоритет мають елементи популяції, які характеризуються найкращими, для цієї задачі – найменшими значеннями фітнес-функції. Батьківські пари визначаємо методом рулетки (рис. 2).

Таблиця 2

Значення фітнес-функції елементів початкової популяції

№ п/п	1	2	3	4	5
код	553614	113331	464064	125075	700375
f	110167	150299	108956	137697	93356
№ п/п	6	7	8	9	10
код	751327	424111	354451	656110	532560
f	106390	119773	116127	95320	113378

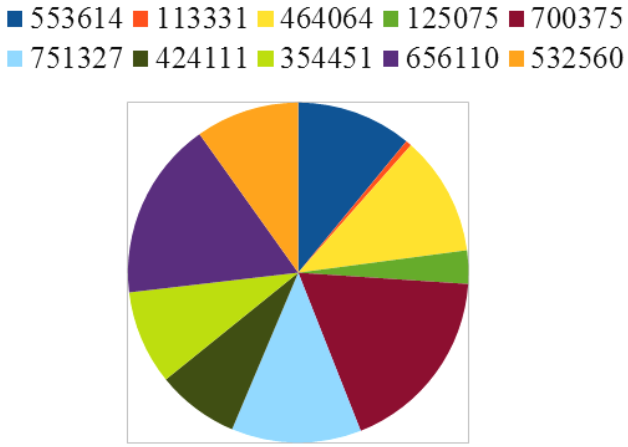


Рис. 2. Ілюстрація методу рулеткового відбору

Очевидно, що найбільша ймовірність формування батьківських пар спостерігається у п'ятого елемента початкової популяції, а найменша – у другого.

Реалізація операцій кросинговеру та мутацій з отриманими батьківськими парами породжує нові проектні рішення, які утворюють перше покоління. Далі організуємо циклічне виконання генетичних операцій за наведеним вище алгоритмом. Еволюційний процес пошуку оптимального рішення транспортної задачі представлений на діаграмі рис. 3, де показана динаміка зміни трьох характеристик найкращого (min), найгіршого (max) і середньозваженого (mid).

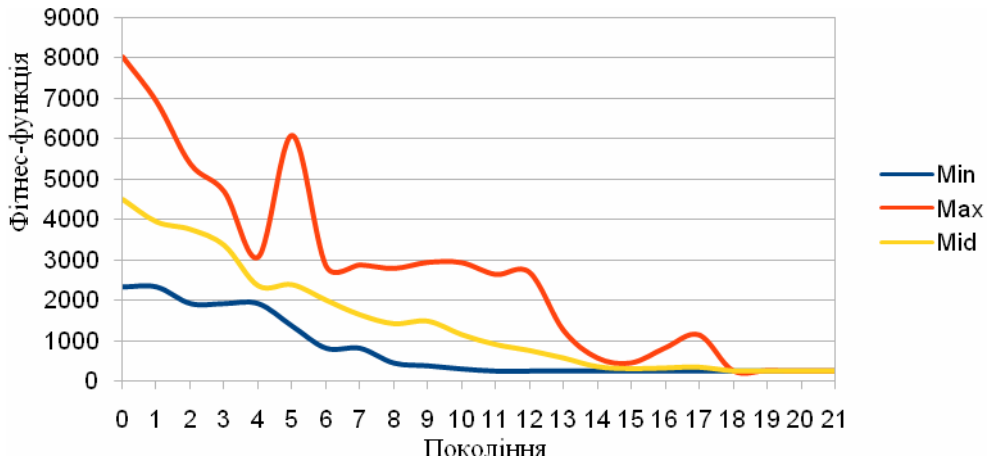


Рис. 3. Діаграма динаміки еволюційного процесу пошуку

Як випливає з даних рис. 3, після виконання 20 ітерацій генетичний алгоритм повністю збігається з оптимальним розв'язком транспортної задачі, схему електричної мережі якого наведено на рис. 4.

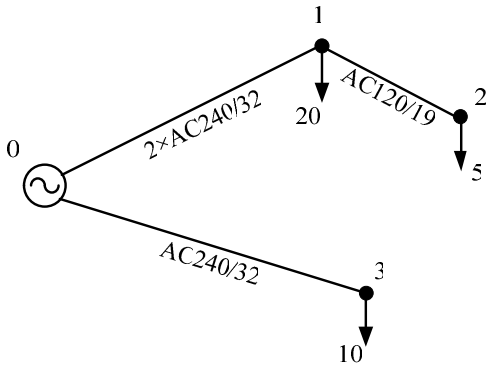


Рис. 4. Оптимальний розв'язок транспортної задачі

Аналіз отриманого результату свідчить, що оптимальне рішення транспортної задачі було отримано після перегляду менше 200 варіантів спорудження електричної мережі, що становить менше 0,1 % простору пошуку. Зазначимо, що при цьому не була задіяна жодна додаткова експертна інформація щодо доцільності можливих проектних рішень, що становить про перспективи ефективного використання генетичних алгоритмів у практиці прийняття проектних рішень з розвитку електроенергетичних систем.

Висновки

1. Ситуація, що склалася на ринку електричної енергії України, характеризується істотним недоліком комерційної свободи; неспроможністю застосування положень про кредитне покриття; неадекватною конкуренцією; неефективним формуванням оптових цін на електричну енергію; монополізацією ринку постачальниками електричної енергії; незавершеністю структури контрактів; перешкодами для приватних інвесторів; перехресними субсидіями в оптових цінах на електроенергію; відсутністю ринку допоміжних послуг.

2. Діючі методики техніко-економічного обґрунтування варіантів розвитку основних мереж енергосистем України є застарілими і не відповідають сучасним реаліям ринкових відносин.

3. Розроблено математичну модель та алгоритм прийняття проектних рішень з розвитку електроенергетичних систем, які базуються на апараті генетичних алгоритмів. Запропонований підхід забезпечує розгляд різноманітних, особливо нетипових рішень проектних задач, що гарантує виявлення найбільш ефективного проектного рішення в багатофакторному просторі пошуку.

4. Застосування генетичних алгоритмів оптимізації проектного рішення характеризуються високою ефективністю і кращими властивостями порівняно з методами неінформативного та евристичного пошуку, що забезпечує виявлення оптимального рішення у всьому просторі пошуку за прийнятну кількість кроків.

5. Ефективне використання математичного апарату генетичних алгоритмів у задачах прийняття проектних рішень розвитку електроенергетичних систем вимагає вирішення проблеми налаштування параметрів алгоритму – обсягу початкової популяції, тривалість життєвого циклу породжуваних рішень, способу формування батьківських пар, імовірнісних характеристик генетичних операцій тощо. Для розв'язання такої задачі автори передбачають використовувати апарат нечіткої логіки, що забезпечує виконання «тонкого» налаштування генетичного алгоритму на основі вербальних оцінок його функціонування.

Список використаних джерел

1. *Поспелов Г. Е.* Электрические системы и сети. Проектирование : учебное пособие для вузов / Г. Е. Поспелов, В. Г. Федин. – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 308 с.

2. *Балаков Ю. Н.* Проектирование схем электроустановок : учебное пособие для вузов / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. – М. : МЭИ, 2006. – 288 с.

3. *Проектування* електричних мереж напругою 0,4-110 кВ. ГІД 34.20.178:2005 : рекомендації (чинні від 01.06.2005). – К., 2005. – 43 с.

4. *Кини Р. Л.* Принятие решений при многих критериях : предпочтения и замещения : пер. с англ. / Р. Л. Кини, Х. Хайфа. – М. : Радио и связь, 1981. – 560 с.

5. *Сулейманов В. М.* Вибір оптимальних схем побудови та режимів електроенергетичних систем на основі багатокритеріального аналізу / В. М. Сулейманов, В. А. Баженов, Т. Л. Кацадзе. – К., 2009. – 128 с.

6. *Непомнящий А. В.* Учёт надёжности при проектировании энергосистем / А. В. Непомнящий. – М. : Энергия, 1978.

7. *Чехов В. И.* Экологические аспекты передачи электроэнергии / В. И. Чехов. – М. : МЭИ, 1991. – 44 с.

8. *Субботін С. О.* Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей : монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.

9. *Бондарев В. Н.* Искусственный интеллект : учебное пособие / В. Н. Бондарев, Ф. Г. Аде. – Севастополь : Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та, 2002. – 616 с.

10. *Holland J. H.* Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence / J. H. Holland. – London : Bradford book edition, 1992. – 211 p.

11. *Генетические* алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев и др. – Х. : ОСНОВА, 1997. – 112 с.

12. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы : пер. с польського / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М., 2006. – 452 с.

13. *Гладков Л. А.* Генетические алгоритмы : учебное пособие / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; под ред. В. М. Курейчика. – Ростов-на-Дону : ООО «Ростиздат», 2004. – 400 с.

УДК 621.391

С.В. Зайцев, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна
В.В. Приступа, аспірант
Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору Національної академії наук України, м. Київ, Україна
В.М. Василенко, магістр
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ ІЗ СИГНАЛАМИ OFDM З ВНУТРІБІТОВОЮ ПСЕВДОВИПАДКОВОЮ ПЕРЕБУДОВОЮ ПІДНЕСУЧИХ ЧАСТОТ

С.В. Зайцев, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина
В.В. Приступа, аспирант
Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства Национальной академии наук Украины, г. Киев, Украина
В.М. Василенко, магистр
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ОЦЕНКА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ С СИГНАЛАМИ OFDM С ВНУТРИБИТОВОЙ ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ПОДНЕСУЩИХ ЧАСТОТ

S.V. Zaitsev, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine
V.V. Prystupa, post-graduate student
Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
V.M. Vasylenko, master
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

INTERFERENCE EVALUATION OF STABILITY OF WIRELESS NETWORKS WITH OFDM SIGNALS WITH INTERNAL BIT PSEUDO-RANDOM PERMUTATIONS OF SUB-CARRIERS

Отримано аналітичні залежності для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки в безпровідних мережах і сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот, що дозволяють оцінити завадозахищеність цих мереж за умов впливу організованих завад.

Ключові слова: *технологія OFDM, розширення спектра, завадозахищеність.*

Получены аналитические зависимости для расчета средней вероятности битовой ошибки в беспроводных сетях с сигналами OFDM с внутрибитовой псевдослучайной перестройкой поднесущих частот, которые позволяют оценить помехозащищенность этих сетей в условиях воздействия организованных помех.

Ключевые слова: *технология OFDM, расширение спектра, помехозащищенность.*

We obtain analytical expressions for the calculation of the average bit error rate in wireless networks with OFDM signals with in a pseudo-random bit permutation of sub-carriers which allow us to estimate noise immunity of these networks under the influence of organized interference.

Key words: *technology OFDM, spread spectrum, interference stability.*

Постановка проблеми. На сьогодні фізичний рівень відомчих безпровідних мереж ґрунтується на використанні технологій розширення спектра сигналів та корегувальних кодів [1; 2]. До основних методів розширення спектра сигналів, які широко застосовуються у сучасних безпровідних мережах, відносяться метод безпосередньої модуляції несучої псевдовипадковою послідовністю та метод псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ) [1; 2]. Розширення спектра є спосіб передачі, при якому сигнал займає смугу частот більш широку в порівнянні зі смугою, мінімально необхідною для передачі інформації; розширення смуги частот сигналу забезпечується спеціальним кодом, який не залежить від інформації, що передається; для подальшого звуження смуги частот

сигналу і відтворення даних у приймальному пристрої також використовується спеціальний код, який аналогічний коду в передавачі і синхронізований з ним. Безпровідні мережі, в яких застосовуються сигнали з розширенням спектра, мають певні переваги: підвищена завадостійкість, енергетична скритність, здатність протистояти навмисним завадам. Під завадозахищеністю розуміється здатність мережі забезпечувати задані показники достовірності передачі інформації в умовах впливу шуму та навмисних завад.

Аналіз досліджень і публікацій. Сучасні засоби відомчих безпровідних мереж для підвищення достовірності передачі інформації застосовують розширення спектра методом безпосередньої модуляції несучої псевдовипадковою послідовністю та метод псевдовипадкової перебудови робочої частоти як коригувальні коди застосовуються коди Ріда-Соломона. Аналіз характеристик зазначених засобів показав, що вони мають порівняно низьку завадозахищеність та пропускну спроможність [1; 2].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Пропонується для підвищення пропускної спроможності безпровідних мереж спеціального призначення використовувати адаптивну технологію ортогонально-частотного мультиплексування OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing). Але у зв'язку з тим, що безпровідні системи працюють в умовах навмисних завад, виникає необхідність додатково застосовувати методи розширення спектра сигналів, а саме – внутрібітову псевдовипадкову перебудову піднесучих частот (ППППЧ) сигналу OFDM. Виникає завдання дослідження засобів безпровідних мереж з використанням сигналів OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот.

Мета статті. Метою роботи є дослідження характеристик завадозахищеності безпровідних мереж із сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот.

Виклад основного матеріалу. Система OFDM з внутрібітовою ППППЧ складається з передавальної та приймальної частин. Передавальна та приймальна частини мають у своєму складі такі елементи: кодер (декодер) прямого розширення спектра за допомогою кодів Уолша (розширення/звуження Уолша), модулятор (демодулятор) OFDM з ППППЧ, формувачі псевдовипадкових послідовностей. За допомогою кодів Уолша та модулятора сигналу OFDM з ППППЧ формується саме система OFDM з внутрібітовою ППППЧ.

Основна ідея методу OFDM полягає в тому, що смуга пропускання каналу розбивається на групу вузьких смуг (субканалів), кожна зі своєю піднесучою. На всіх піднесучих сигнал передається одночасно, що дозволяє забезпечити велику швидкість передачі інформації при невеликій швидкості передачі в кожному окремому субканалі [3]. Сигнал OFDM складається із N ортогональних піднесучих, модульованих N паралельними потоками даних.

Формування підканалів з ортогональними піднесучими відбувається за допомогою процедури зворотного дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) [3]. На практиці процедури зворотного ДПФ (на передаючій стороні) та прямого ДПФ (на прийомній) реалізуються за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) та виконуються процесором ШПФ [3].

Для системи OFDM-ППППЧ матрицю зворотного перетворення Фур'є $\left[W_F^{-1}\right]_{k,n}$ можна представити виразом:

$$\left[W_F^{-1}\right]_{k,n} = e^{j2\pi n[\Xi]_{k,n}/N},\ k,n = \overline{0,(N-1)}. \quad (1)$$

Матриця $\left[W_F^{-1}\right]_{k,n}$ дозволяє здійснити розширення спектра сигналу методом псевдовипадкової перебудови піднесучої частоти сигналу OFDM. У виразі (1) матриця $\left[\Xi\right]_{k,n}$ формує модель стрибків піднесучих частот.

У звичайній схемі OFDM матриця $\left[\Xi\right]_{k,n}$ буде мати такий вигляд:

$$\left[\Xi\right]_{k,n}=\begin{bmatrix}0 & 1 & \dots & (N-1)\\ 0 & 1 & \dots & (N-1)\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 1 & \dots & (N-1)\end{bmatrix}. \tag{2}$$

У цьому випадку $\left[W_F^{-1}\right]_{k,n}=\left[W^{-1}\right]_{k,n}$:

$$W_F^{-1}=W^{-1}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & \cdots & 1\\ 1 & e^{j2\pi/N} & e^{j4\pi/N} & \dots & e^{j2\pi(N-1)/N}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 1 & e^{j2\pi(N-2)/N} & e^{j4\pi(N-2)/N} & \dots & e^{j2\pi(N-1)(N-2)/N}\\ 1 & e^{j2\pi(N-1)/N} & e^{j4\pi(N-1)/N} & \dots & e^{j2\pi(N-1)(N-1)/N}\end{bmatrix}. \tag{3}$$

Матриця $\left[\Xi\right]_{k,n}$ отримується таким виразом:

$$\left[\Xi\right]_{k,n}=\mathrm{mod}\left[\left(f_n+k\right),\left(N-1\right)\right]=\begin{bmatrix}0 & 1 & \dots & (N-1)\\ 1 & 2 & \dots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ (N-1) & 0 & \dots & (N-2)\end{bmatrix}. \tag{4}$$

Використовуючи вираз (4), матриця $\left[W_F^{-1}\right]_{k,n}$ буде мати такий вигляд:

$$W_F^{-1}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & \cdots & 1\\ e^{j2\pi/N} & e^{j4\pi/N} & e^{j6\pi/N} & \cdots & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ e^{j2\pi(N-2)(N-2)/N} & e^{j2\pi(N-2)(N-1)/N} & 1 & \cdots & e^{j2\pi(N-2)(N-3)/N}\\ e^{j2\pi(N-1)(N-1)/N} & 1 & e^{j2\pi(N-1)/N} & \cdots & e^{j2\pi(N-1)(N-2)/N}\end{bmatrix}. \tag{5}$$

Часова вибірка сигналу OFDM з ППШЧ записується таким чином:

$$s\left(n\right)=W_F^{-1}X\left(k\right). \tag{6}$$

Або для $k,n=\overline{0,(N-1)}$:

$$\begin{bmatrix}s(0)\\ s(1)\\ \vdots\\ s(N-1)\end{bmatrix}=W_F^{-1}\times\begin{bmatrix}X(0)\\ X(1)\\ \vdots\\ X(N-1)\end{bmatrix}=$$
$$=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1 & \cdots & 1\\ e^{j2\pi/N} & e^{j4\pi/N} & e^{j6\pi/N} & \cdots & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ e^{j2\pi(N-2)(N-2)/N} & e^{j2\pi(N-2)(N-1)/N} & 1 & \cdots & e^{j2\pi(N-2)(N-3)/N}\\ e^{j2\pi(N-1)(N-1)/N} & 1 & e^{j2\pi(N-1)/N} & \cdots & e^{j2\pi(N-1)(N-2)/N}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}X(0)\\ X(1)\\ \vdots\\ X(N-1)\end{bmatrix}. \tag{7}$$

На прийомній стороні необхідно виконати зворотні операції вищеописаним способом.

Формування сигналу OFDM з внутрібітовою ППШЧ відбувається за допомогою розширення Уолша.

Нехай $x=[x(0), x(1), \ldots, x(N-1)]^T$ – N комплексних модульованих символів, які передаються. Тоді сигнал $[X(k), k=0,1,\ldots,N]$, який передається на k-й піднесучій та утворений за допомогою кодів Уолша, набуде вигляду:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \vdots \\ X(N-1) \end{bmatrix} = R_N \times \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix}, \tag{8}$$

де R_N – це матриця Адамара розміром $N \times N$:

$$R_N = \begin{pmatrix} R_{N/2} & R_{N/2} \\ R_{N/2} & -R_{N/2} \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Перші три матриці Адамара будуть мати такий вигляд:

$$R_1 = [1],\ R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},\ R_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Кожен стовбець та кожний рядок матриці Адамара відповідають коду Уолша довжини N. Матриця Адамара – це ортогональна матриця, така, що:

$$R_N^{-1} \times R_N = I_N. \tag{11}$$

Кожний ряд ортогональний усім іншим рядам, кожний стовбець ортогональний усім іншим стовпцям.

Таким чином, сигнал OFDM з внутрібітовою ППШЧ набирає вигляд:

$$\begin{bmatrix} s(0) \\ s(1) \\ \vdots \\ s(N-1) \end{bmatrix} = W_F^{-1} \times \begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \vdots \\ X(N-1) \end{bmatrix} = W_F^{-1} \times R_N \times \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{j2\pi/N} & e^{j4\pi/N} & e^{j6\pi/N} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{j2\pi(N-2)(N-2)/N} & e^{j2\pi(N-2)(N-1)/N} & 1 & \cdots & e^{j2\pi(N-2)(N-3)/N} \\ e^{j2\pi(N-1)(N-1)/N} & 1 & e^{j2\pi(N-1)/N} & \cdots & e^{j2\pi(N-1)(N-2)/N} \end{bmatrix} \times \tag{12}$$

$$\times \begin{bmatrix} R_{N/2} & R_{N/2} \\ R_{N/2} & -R_{N/2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix}.$$

На наступному етапі оцінимо завадозахищеність розглянутої моделі.

У роботі розглядаються такі види навмисних завад: шумова загороджувальна завада, шумова завада в частині смуги й завада у відповідь, моделі яких представляють обмежений по смузі адитивний білий гауссівський шум.

В умовах впливу навмисних завад використовується K_s^g субканалів системи OFDM для передачі одного пакета інформації. Якщо навмисні завади відсутні або їх рівень відповідає встановленим рівням, використовується один субканал для передачі одного пакета інформації.

Середню ймовірність бітової помилки системи з сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот можна розрахувати за такою формулою:

$$P_B = \sum_{k=1}^{M} P_{Bk} + \sum_{l=1}^{K} P_{Bl}, \tag{13}$$

де P_{Bk} – середня ймовірність бітової помилки в k-му, $k \in \overline{1,M}$, субканалі системи OFDM в умовах впливу тільки білого гауссівського шуму, P_{Bl} – середня ймовірність бітової помилки в l-му, $l \in \overline{1,K}$, наборі субканалів системи OFDM в умовах впливу білого гауссівського шуму та завад, при цьому $M + K = N$.

Розглянемо передачу одного пакета інформації в умовах впливу навмисних завад, використовуючи K_s^g субканалів системи OFDM.

У [4] доведена формула для розрахунку ймовірності помилки на біт при маніпуляційному коді Грея для модуляції ФМ-M, $M > 2$:

$$P_{b1} = P_{b2} = \frac{4}{M} \sum_{j=1}^{M/4} Q\left(\sqrt{2h_m^2} \sin\left[\frac{(2j-1)}{M} \pi \right] \right) \tag{14}$$

для перших двох біт та

$$P_{bi} = \frac{2^{i+1}}{M} \sum_{j=1}^{M/4} (-1)^{ent\left[\frac{j-1}{2^{K+1-i}} \right]} T\left(\sqrt{2h_m^2} \sin\left[\frac{(2j-1)}{M} \pi \right], ctg \frac{(2j-1)}{M} \pi \right), \tag{15}$$

при $i \geq 3$, де $h_m^2 = E_m / G_0 = h_0^2 \log_2 M$ – відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму, $h_0^2 = \dfrac{E_b}{G_0}$, E_b – енергія біта, $M = 2^K$ – розмірність сигнального сузір'я, функція $Q(x) = \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\dfrac{t^2}{2} \right) dt$ – функція інтеграла ймовірності, $T(h,a) = \dfrac{1}{2\pi} \int_0^a \exp\left[\left(-\dfrac{h^2}{2}\left(1+x^2\right) \right) \right] \dfrac{1}{1+x^2} dx$ – функція Д. Оуена, призначена для обчислення функції двовимірного нормального розподілу.

Для визначення середньої ймовірності помилки на біт існує формула [3]:

$$P_B = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{K} P_{bi}. \tag{16}$$

Для розрахунку ймовірності помилки на біт при модуляції ФМ-2 використовується точна формула [3]:

$$P_B = Q\left(\sqrt{2h_0^2} \right) = Q\left(\sqrt{2 \frac{E_b}{G_0}} \right). \tag{17}$$

Відповідно до (14), (16) середня ймовірність помилки на біт при модуляції ФМ-4 визначається:

$$P_B = Q\left(\sqrt{2h_m^2}\sin\frac{\pi}{M}\right) = Q\left(\sqrt{2h_0^2\log_2 M}\sin\frac{\pi}{M}\right) = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{G_0}}\right). \quad (18)$$

Середні ймовірності бітової помилки для модуляцій ФМ-2 і ФМ-4 рівні при точних формулах розрахунку.

Для визначення середньої ймовірності бітової помилки для модуляції ФМ-8 визначаються ймовірності P_{b1}, P_{b2}, P_{b3} згідно з (14), (15):

$$P_{b1} = P_{b2} = \frac{1}{2}\left(Q\left(\sqrt{2h_m^2}\sin\frac{\pi}{8}\right) + Q\left(\sqrt{2h_m^2}\sin\frac{3\pi}{8}\right)\right) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8}\right) + \\ +Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8}\right)\end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} P_{b3} &= 2\left(T\left(\sqrt{2h_m^2}\sin\frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right) + T\left(\sqrt{2h_m^2}\sin\frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\right) = \\ &= 2\left(T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right) + T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\right). \end{aligned} \quad (20)$$

Таким чином, середня ймовірність бітової помилки при модуляції ФМ-8 дорівнює:

$$P_B = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8}\right) + Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8}\right) + \\ 2\left(T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right) + T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\right)\end{pmatrix}. \quad (21)$$

Під час впливу шумової загороджувальної завади на безпровідну мережу параметр h_0^2 перетвориться в [3]

$$h_{01j}^2 = \frac{E_b}{G_0 + G_j}, \quad (22)$$

де G_j – спектральна щільність потужності навмисної завади.

Для шумової завади в частині смуги параметр h_{02j}^2 буде визначений як [3]:

$$h_{02j}^2 = \frac{E_b}{G_0 + \frac{G_j}{\gamma}}, \quad (23)$$

де γ – частина смуги частот, де є завада.

У випадку застосування постановником завад завади у відповідь h_{03j}^2 буде мати вигляд [3]:

$$h_{03j}^2 = \frac{E_b}{G_0 + G_j}. \quad (24)$$

Однією з важливих характеристик безпровідних мереж із розширенням спектра з погляду завадостійкості є коефіцієнт розширення спектра K_s. Цей коефіцієнт характеризує міру збільшення відношення сигнал-завада в результаті згортання (стиску) розширеної смуги частот радіосигналу й приведення її до смуги частот інформаційного сигналу.

Коефіцієнт розширення спектра K_s сигналу методом псевдовипадкової перебудови піднесучої частоти визначається виразом [3]:

$$K_s^1 = \frac{\Delta F_s}{F_s}, \quad (25)$$

де ΔF_S – смуга частот, займана сигналом, F_S – ширина смуги одного частотного каналу. Під час розширення спектра методом ППРЧ загальна смуга частот $\Delta F_s \geq \frac{a \cdot M_f}{T_h}$, де M_f – число частотних каналів, T_h – тривалість стрибка частоти, $\frac{a}{T_h}$ – частотний інтервал, значення якого вибирається з умови більш повного виключення впливу суміжних каналів один на одного [3]. Значення параметра a, як правило, вибирається в межах 1...2. З обліком цього вираз (25) перепишеться таким чином:

$$K_s^1 = \frac{a \cdot M_f}{T_h \cdot F_s}. \quad (26)$$

Якщо прийняти, що ведеться посимвольна передача зі швидкістю 1 символ/стрибок, a = 1, отже $T_h \cdot F_s = 1$, то коефіцієнт розширення спектра K_s буде дорівнювати числу використовуваних частотних каналів M_f засобу радіозв'язку із ППРЧ:

$$K_s^1 = M_f. \quad (27)$$

Відповідно, коефіцієнт розширення спектра з використанням матриць Адамара дорівнює:

$$K_s^2 = N, \quad (28)$$

де N – порядок матриці Адамара.

У випадку сумісного застосування методу ППРЧ та методу розширення спектра на основі матриць Адамара, коефіцієнт розширення спектра в гібридній схемі дорівнює добутку коефіцієнтів розширення спектра, які отримуються окремо для кожного з методів:

$$K_s^g = K_s^1 K_s^2 = M_f N. \quad (29)$$

З урахуванням коефіцієнта розширення спектра K_s^g вирази (22), (23) при впливі шумової загороджувальної завади й шумової завади в частині смуги відповідно будуть мати такий вигляд:

$$h_{02j}^2 = \left(\frac{G_0}{E_b} + \frac{\log_2 M \cdot P_j}{K_s^g \cdot P_b} \right)^{-1} = \left(\left(\frac{E_b}{G_0} \right)^{-1} + \left(\frac{K_s^g \cdot P_b}{P_j \log_2 M} \right)^{-1} \right)^{-1} = \left(\left(h_0^2 \right)^{-1} + \left(\frac{q}{\log_2 M} \right)^{-1} \right)^{-1}, \quad (30)$$

$$h_{03j}^2 = \left(\frac{G_0}{E_b} + \frac{\log_2 M \cdot P_j}{\gamma \cdot K_s^g \cdot P_b} \right)^{-1} = \left(\left(\frac{E_b}{G_0} \right)^{-1} + \left(\frac{\gamma \cdot K_s^g \cdot P_b}{P_j \log_2 M} \right)^{-1} \right)^{-1} = \left(\left(h_0^2 \right)^{-1} + \left(\gamma \cdot \frac{q}{\log_2 M} \right)^{-1} \right)^{-1}, \quad (31)$$

де P_b – потужність сигналу, P_j – потужність завади, $q = \frac{K_s^g \cdot P_b}{P_j}$.

При заваді у відповідь коефіцієнт розширення спектра не враховується [1].

Підставивши (30) в (17), (18), (21) замість h_0^2 одержимо точні формули ймовірності бітової помилки для сигналів ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8 відповідно при впливі шумової заго-

роджувальної завади на безпровідну мережу з сигналами OFDM з ППШЧ, при цьому використовуються набори із $l \in \overline{1,K}$ субканалів:

– ФМ-2:

$$P_B = Q\left(\sqrt{2\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(q\right)^{-1}\right)^{-1}}\right). \quad (32)$$

– ФМ-4:

$$P_B = Q\left(\sqrt{2\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(\frac{q}{2}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right). \quad (33)$$

– ФМ-8:

$$P_B = \frac{1}{3}\left\{Q\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{\pi}{8}\right) + Q\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{3\pi}{8}\right) + 2\left(T\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right) + T\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\right)\right\}. \quad (34)$$

Імовірність бітової помилки при впливі шумової завади в частині смуги на безпровідну мережу з сигналами OFDM з ППШЧ (використовуються набори із $l \in \overline{1,K}$ субканалів) буде мати такий вигляд:

$$P_{B1} = (1-\gamma)P_B + \gamma P_{Bj}. \quad (35)$$

У цій формулі P_B визначається за формулою (17) для ФМ-2, ФМ-4 і за формулою (21) для ФМ-8, а P_{Bj} за допомогою підстановки (31) у (17) замість h_0^2 для ФМ-2, ФМ-4 і (31) у (21) замість h_0^2 для ФМ-8:

– ФМ-2:

$$P_{B1} = (1-\gamma)Q\left(\sqrt{2h_0^2}\right) + \gamma Q\left(\sqrt{2\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(\gamma\cdot q\right)^{-1}\right)^{-1}}\right). \quad (36)$$

– ФМ-4:

$$P_{B1} = (1-\gamma)Q\left(\sqrt{2h_0^2}\right) + \gamma Q\left(\sqrt{2\left(\left(h_0^2\right)^{-1} + \left(\gamma\cdot\frac{q}{2}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right). \quad (37)$$

– ФМ 8:

$$P_{B1}=(1-\gamma)\frac{1}{3}\begin{pmatrix} Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8}\right)+Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8}\right)+ \\ 2\left(T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right)+T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\right)\end{pmatrix}+$$

$$+\gamma\frac{1}{3}\begin{pmatrix} Q\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\cdot\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{\pi}{8}\right)+Q\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\cdot\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{3\pi}{8}\right)+ \\ +2\begin{pmatrix} T\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\cdot\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right)+ \\ T\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\cdot\frac{q}{3}\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{3\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\end{pmatrix}\end{pmatrix}. \quad (38)$$

При впливі завади у відповідь ймовірність бітової помилки визначається:

$$P_{B2}=(1-\gamma)P_B+\gamma P_{Bj}. \quad (39)$$

У цій формулі P_B визначається за формулою (17) для ФМ-2, ФМ-4 і за формулою (21) для ФМ-8, а P_{Bj} за допомогою підстановки (24) у (17) для ФМ-2, ФМ-4 і в (21) для ФМ-8:

– ФМ-2, ФМ-4:

$$P_{B2}=(1-\gamma)Q\left(\sqrt{2h_0^2}\right)+\gamma Q\left(\sqrt{2\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(h_j^2\right)^{-1}\right)^{-1}}\right). \quad (40)$$

– ФМ-8:

$$P_{B2}=(1-\gamma)\frac{1}{3}\begin{pmatrix} Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8}\right)+Q\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8}\right)+ \\ 2\left(T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right)+T\left(\sqrt{6h_0^2}\sin\frac{3\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\right)\end{pmatrix}+$$

$$+\gamma\frac{1}{3}\begin{pmatrix} Q\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(h_j^2\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{\pi}{8}\right)+Q\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(h_j^2\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{3\pi}{8}\right)+ \\ 2\left(T\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(h_j^2\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{\pi}{8}\right)+T\left(\sqrt{6\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(h_j^2\right)^{-1}\right)^{-1}}\sin\frac{3\pi}{8},\operatorname{ctg}\frac{3\pi}{8}\right)\right)\end{pmatrix}, \quad (41)$$

де $h_j^2=\frac{E_b}{G_j}$ – відношення енергії біта до спектральної щільності потужності завади.

Аналогічним чином отримуються аналітичні залежності для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки при впливі шумової загороджувальної завади, шумової завади в частині смуги та завади у відповідь на безпровідну мережу з сигналами OFDM з ППФЧ під час використання в субканалах модуляції КАМ-16, КАМ-64. Так, при впливі шумової завади в частині смуги, отримуємо такі математичні залежності:

– КАМ-16:

$$P_{b1} = (1-\gamma)\left(\frac{1}{2}\left(3Q\left(\sqrt{\frac{4}{9}h_0^2}\right)+2Q\left(3\sqrt{\frac{4}{9}h_0^2}\right)-Q\left(5\sqrt{\frac{4}{9}h_0^2}\right)\right)\right)+$$
$$+\gamma\frac{1}{2}\left(\begin{array}{c}3Q\left(\sqrt{\frac{4}{9}\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\frac{q}{4}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right)+2Q\left(3\sqrt{\frac{4}{9}\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\frac{q}{4}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right)-\\ -Q\left(5\sqrt{\frac{4}{9}\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\frac{q}{4}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right)\end{array}\right). \quad (42)$$

– КАМ-64:

$$P_{b1} = (1-\gamma)\left(\frac{7}{6}Q\left(\sqrt{\frac{6}{49}h_0^2}\right)+Q\left(3\sqrt{\frac{6}{49}h_0^2}\right)-\frac{1}{6}Q\left(4\sqrt{\frac{6}{49}h_0^2}\right)-\frac{1}{6}Q\left(5\sqrt{\frac{6}{49}h_0^2}\right)\right)+$$
$$+\gamma\left(\begin{array}{c}\frac{7}{6}Q\left(\sqrt{\frac{6}{49}\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\frac{q}{6}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right)+Q\left(3\sqrt{\frac{6}{49}\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\frac{q}{6}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right)\\ -\frac{1}{6}Q\left(4\sqrt{\frac{6}{49}\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\frac{q}{6}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right)-\frac{1}{6}Q\left(5\sqrt{\frac{6}{49}\left(\left(h_0^2\right)^{-1}+\left(\gamma\frac{q}{6}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right)\end{array}\right). \quad (43)$$

Висновки і пропозиції. У статті отримано аналітичні залежності для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки в безпровідних мережах із сигналами OFDM з ППППЧ з урахуванням впливу навмисних завад, що дозволяють кількісно оцінити завадозахищеність безпровідних мереж.

Аналіз завадозахищеності безпровідних мереж із сигналами OFDM з ППППЧ показав, що зі збільшенням коефіцієнта розширення спектра в запропонованій гібридній схемі підвищуються завадозахищеність безпровідних мереж в умовах впливу потужних організованих завад.

Напрямком подальших досліджень вважається дослідження характеристик завадозахищеності безпровідних мереж із сигналами OFDM та ППППЧ з використанням різних коригувальних кодів.

Список використаних джерел

1. *Помехозащищенность* систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев и др. – М. : Радио и связь, 2000. – 384 с.

2. *Помехозащищенность* систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей певдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев и др. – М. : Радио и связь, 2003. – 640 с.

3. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е издание. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.

4. *Бураченко Д. Л.* Сигнальные конструкции. Приложения : учебное пособие : ч. 3 / Д. Л. Бураченко, Н. В. Савищенко. – СПб., 2005. – С. 3-28.

УДК 681.5.033.2

Р.В. Заровський, канд. техн. наук
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ З ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ ПЕРШОГО РОДУ

Р.В. Заровский, канд. техн. наук
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПЕРВОГО РОДА

R.V. Zarovskyi, Candidate of Technical Sciences
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

OPTIMIZATION OF VOLTAGE REGULATION SYSTEM WITH PWM FOR SPEED (HIGH-SPEED OPERATION)

У роботі виконано розрахунок параметрів нелінійних корегуючих ланок з метою оптимізації за швидкодією дискретно-неперервної системи стабілізації напруги з широтно-імпульсною модуляцією першого роду при використанні різних критеріїв оптимальності, проведене моделювання роботи скорегованої системи.

Ключові слова: *дискретно-неперервні системи, широтно-імпульсна модуляція, синтез регулятора.*

В работе выполнен расчет параметров нелинейных корректирующих звеньев для дискретно-непрерывной системы стабилизации напряжения с широтно-импульсной модуляцией первого рода при использовании различных критериев оптимальности, проведено моделирование работы системы с синтезированными регуляторами.

Ключевые слова*: дискретно-непрерывные системы, широтно-импульсная модуляция, синтез регулятора.*

In the paper the design of nonlinear regulators for discrete-continuous stabilization system with wide range PWM is implemented. Simulation of the system with regulators is performed.

Key words*: discrete-continuous system, pulse-width modulation, design of regulator.*

Вступ. У сучасних системах автоматизованого електропривода та силової електроніки надзвичайно широкого вжитку набули широтно-імпульсні перетворювачі (ШІП) напруги, що, зокрема, обумовлено високим коефіцієнтом їх корисної дії. В таких перетворювачах для регулювання вихідної напруги використовують метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), переважно, першого роду. Широке застосування подібних перетворювачів робить надзвичайно актуальними питання аналізу, синтезу та оптимізації систем автоматичного керування (САК), у складі яких вони використовуються. При цьому основна складність полягає у способі представлення ШІП як ланки системи автоматичного керування. Проектувальники часто вдаються до спрощеного представлення імпульсного перетворювача, при якому нехтують дискретним характером процесу модуляції та враховують лише постійну складову вихідної напруги перетворювача, що є неприпустимим під час аналізу систем з широкою смугою пропускання, або систем з достатньо високими вимогами до точності регулювання вихідного параметра. Врахування зазначених факторів виявляє суттєву нелінійність перетворювача як ланки САК, що, в свою чергу, зумовлює неможливість застосування класичних методів аналізу лінійних імпульсних систем. У таких системах вихідний сигнал ШІП можна апроксимувати рядом функцій Уолша [1], при цьому ми одержуємо багатоконтурну систему з еквівалентною амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ) апроксимуючих функцій Уолша, що дозволяє виконувати аналіз досліджуваної системи із застосуванням апарата Z-перетворень.

Користуючись таким представленням ШІП, у роботах [2; 4] виконано аналіз похибки регулювання для систем з глибокою ШІМ, а в роботі [5] запропоновано загальний метод синтезу регулятора для таких систем.

Ця робота продовжує цикл статей з аналітичного розрахунку систем з глибокою ШІМ першого роду при урахуванні дискретного характеру процесу модуляції та присвячена питанням їх оптимізації за швидкодією.

Методи і результати. Розглянемо типову одноконтурну імпульсну систему стабілізації напруги, структура якої наведена на рис. 1, де: $U_{ВХ}, U_{ВИХ}$ – сигнал завдання та вихідна напруга системи стабілізації відповідно; ε – похибка регулювання; СК – система керування, яка формує сигнал керування ШІП U (значення коефіцієнта заповнення для широтно-модульованого сигналу); $U_{ШІП}$ – вихідна напруга ШІП, що є напругою живлення для об'єкта керування (ОК).

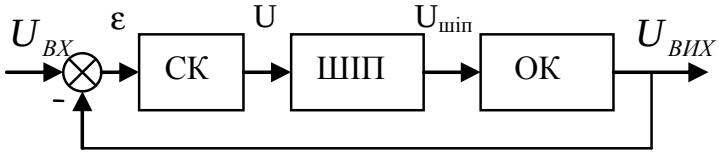


Рис. 1. Імпульсна система стабілізації напруги з ШІМ

Задля оптимізації за швидкодією розглянутої системи рис. 1 скористаємось запропонованим у роботі [5] загальним методом синтезу регулятора для систем з глибокою ШІМ першого роду. Згідно з яким на першому етапі виконується апроксимація широтно-модульованих сигналів на виході ШІП $U_{ШІП}$ за допомогою функцій Уолша та отримується багатоконтурна модель системи з еквівалентною АІМ функцій Уолша в окремих каналах. У подальшому аналізі враховується лише постійна складова сигналу $U_{ШІП}$ (один контур).

На наступному етапі проводиться апроксимація нелінійності a_{Wal_0} за допомогою поліномів Эрміта, обмежуючись 3-м порядком апроксимуючого поліному: $a_{Wal_0} = 1{,}12*U - 0{,}01*U^3$. При цьому результуюча система набуває вигляду, що представлений на рис. 2, де: ІЕ – імпульсні елементи, які спрацьовують з періодом T; ФНП – фіксатор нульового порядку.

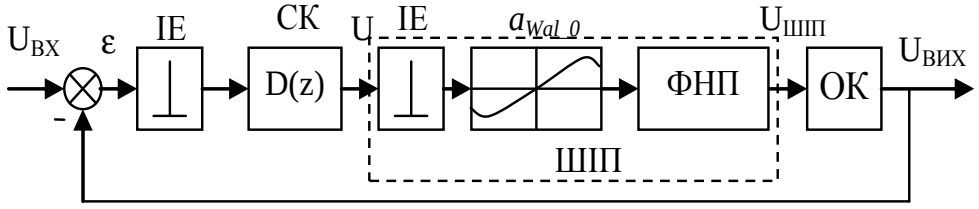


Рис. 2. Нелінійна імпульсна система стабілізації напруги з ШІМ першого роду (постійна складова)

Оптимізацію системи виконаємо на прикладі об'єкта керування з передавальною функцією

$$W(q) = k_1 \frac{\alpha}{q(q+\alpha)}, \tag{1}$$

при наступних числових значеннях параметрів системи: $k_1 = 1$, $\alpha = 0{,}5$, $T = 1c$.

Передавальна функція наведеної неперервної частини матиме вигляд

$$W(q) = k_1 \frac{1-e^{-q}}{q} \frac{\alpha}{q(q+\alpha)}. \tag{2}$$

Оскільки амплітудна характеристика нелінійного елементу містить лінійну та нелінійну складові, то згідно з [6] еквівалентні лінійна та нелінійна передавальні функції розімкненої системи матимуть такий вигляд

$$W_1(z,0) = d_1 W(z,0) = d_1 Z\{W(q)\} = \frac{A_1 z + A_2}{(z-1)(z+B_1)} = 1{,}12 \frac{0{,}22z + 0{,}17}{(z-1)(z+0{,}61)} = \frac{P(z,0)}{Q_1(z,0)}, \tag{3}$$

$$W_3(z,0) = d_3 W(z,0) = d_3 Z\{W(q)\} = -0,01\frac{0,22z+0,17}{(z-1)(z+0,61)}. \quad (4)$$

На наступному етапі виконується синтез дискретного регулятора для досліджуваної системи, при якому нелінійна корегуюча ланка представляється у вигляді усіченого дискретного ряду Вольтерра [3]. Еквівалентні передавальні функції такого регулятора $D_n(z_1,...,z_n)$ являють собою комбінацію еквівалентних функцій меншого порядку і еквівалентних передавальних функцій неперервної частини вихідної системи (3,4) та можуть бути виражені через лінійну функцію $D_1(z)$. Остання, як зазначається в [3], може бути знайдена за допомогою одного з методів синтезу регуляторів для звичайних лінійних дискретно-неперервних систем за відомою передавальною функцією лініаризованої вихідної системи. Обмежуючись трьома складовими при запису дискретного ряду Вольтерра для корегуючого пристрою і враховуючи, що результат апроксимації нелінійності системи (a_{Wal_0}) є непарною функцією, була отримана структура нелінійного регулятора (рис. 3).

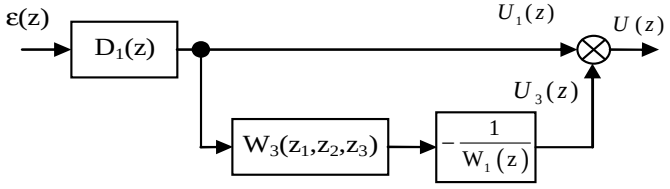


Рис. 3. Результуюча структура нелінійного регулятора досліджуваної системи

У подальшому, для оптимізації системи за швидкодією необхідно виконати синтез послідовної корегуючої ланки $D_1(z)$, який, поряд з вимогою мінімальної і кінцевої тривалості перехідних процесів, будемо проводити, використовуючи додаткові критерії, такі як: здатність фізичної реалізації та грубість системи; забезпечення у скорегованій системі астатизму першого та другого порядку; забезпечення оптимуму за сумарною квадратичною оцінкою.

Першим критерієм для синтезу регулятора буде, поряд з вимогою мінімальної і кінцевої тривалості перехідних процесів, забезпечення астатизму першого порядку в скорегованій системі. Такий приклад для вихідної системи був розглянутий у [5], де на основі вимог до характеристичного рівняння скорегованої системи була отримана система рівнянь

$$\begin{cases} b_1 = 1, \\ b_0 - b_1 + A_1 a_0 = 0, \\ A_2 a_0 = b_0 \end{cases} \quad (5)$$

та знайдений її розв'язок

$$a_0 = \frac{1}{A_1 + A_2} = 2,289;\ b_0 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} = 0,436,\ b_1 = 1, \quad (6)$$

що дозволило отримати такий вигляд передавальної функції регулятора

$$D_1(z) = \frac{a_0(z - B_1)}{b_1 z + b_0} = \frac{2,289(z-0,61)}{z+0,436}. \quad (7)$$

Другим критерієм для синтезу регулятора буде забезпечення в скорегованій системі астатизму другого порядку. При цьому для характеристичного рівняння скорегованої системи, згідно з [6], повинна виконуватись умова

$$P(z,0)M_1(z,0)+(z-1)^2 N_1(z,0)=z^3, \tag{8}$$

де $M_1(z,0)=a_1z+a_0$; $N_1(z,0)=b_1z+b_0$.

Порівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях z в (8), отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} b_1=1, \\ A_1a_1+b_0-2b_1=0, \\ A_1a_0+A_2a_1-2b_0+b_1=0, \\ A_2a_0+b_0=0. \end{cases} \tag{9}$$

Розв'язуючи систему (9), отримуємо значення коефіцієнтів

$$b_0=\frac{A_2(2A_2+A_1)}{(A_1+A_2)^2}=0,626;\ b_1=1;\ a_0=-\frac{(2A_2+A_1)}{(A_1+A_2)^2}=-3,287;\ a_1=\frac{2}{A_1}-\frac{A_2(2A_2+A_1)}{A_1(A_1+A_2)^2}=5,577.$$

Звідки передавальна функція регулятора матиме такий вигляд

$$D_1(z)=\frac{(z-B_1)M_1(z,0)}{(z-1)N_1(z,0)}=\frac{(z-0,61)(5,577z-3,287)}{(z-1)(z+0,626)}. \tag{10}$$

Наступним критерієм для синтезу регулятора, поряд з вимогою мінімальної і кінцевої тривалості перехідного процесу в скорегованій системі, буде налаштування на оптимум за сумарною квадратичною оцінкою. При цьому, згідно з [6], повинні виконуватись такі умови

$$P(z,0)M_1(z,0)+(z-1)N_1(z,0)=z^4, \tag{11}$$

де $M_1(z,0)=a_2z^2+a_1z+a_0$; $N_1(z,0)=b_3z^3+b_2z^2+b_1z+b_0$.

Та

$$z^4(c_1z+c_0)+d_1z+d_0+z(A_1+A_2z)(b_3z^3+b_2z^2+b_1z+b_0)=0. \tag{12}$$

Порівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях z в рівняннях (11), (12), отримуємо таку систему

$$\begin{cases} b_3=1, \\ A_1a_2+b_2-b_3=0, \\ A_1a_1+A_2a_2+b_1-b_2=0, \\ A_1a_0+A_2a_1+b_0-b_1=0, \\ A_2a_0-b_0=0, \\ c_1+A_2b_3=0, \\ c_0+A_1b_3+A_2b_2=0, \\ A_1b_2+A_2b_1=0, \\ A_1b_1+A_2b_0=0, \\ d_1+A_1b_0=0, \\ d_0=0. \end{cases} \tag{13}$$

Розв'язок цієї системи дає такі значення коефіцієнтів

$$m=A_1^5+A_1^4A_2+A_2^2A_1^3+A_2^3A_1^2+A_2^4A_1+A_2^5;\ b_0=\frac{A_2^3A_1^2}{m}=0,133;\ b_1=-\frac{A_2^4A_1}{m}=-0,103,$$

$$b_2 = \frac{A_2^5}{m} = 0,08;\ b_3 = 1;\ a_0 = \frac{A_1^2 A_2^2}{m} = 0,7;\ a_1 = -\frac{A_2 A_1}{A_1^3 + A_2^3} = -2,146;$$

$$a_2 = \frac{A_1^3 A_2 + A_2^2 A_1^2 + A_1^4 + A_2^4 + A_2^3 A_1}{m} = 3,736.$$

Виходячи з цього, передавальна функція регулятора матиме такий вигляд

$$D_1(z) = \frac{(z - B_1) M_1(z,0)}{N_1(z,0)} = \frac{(z - B_1)(a_2 z^2 + a_1 z + a_0)}{b_3 z^3 + b_2 z^2 + b_1 z + b_0} = \frac{(z - 0,61)(3,736 z^2 - 2,146 z + 0,7)}{z^3 + 0,08 z^2 - 0,103 z + 0,133}. \quad (14)$$

Для останнього критерію будемо вимагати від скорегованої системи здатність її фізичної реалізації та грубість, вважаючи при цьому, що передатна функція замкненої скорегованої системи має такий вигляд

$$W_{зам}(z) = \frac{1}{z}. \quad (15)$$

Тоді, згідно з [6], отримаємо наступну передавальну функцію регулятора

$$D_1 = \frac{1}{W_1(z,0)} \cdot \frac{W_{зам}(z,0)}{1 - W_{зам}(z,0)} = \frac{1}{W_1(z,0)} \cdot \frac{1}{z-1} = \frac{Q_1(z,0)}{(z-1)P(z,0)} = \frac{z + B_1}{A_1 z + A_2} = \frac{z + 0,61}{0,246 z + 0,19}. \quad (16)$$

Перевірка достовірності отриманих результатів проводилась з використанням математичних моделей скорегованої та нескорегованої системи стабілізації з ШІМ. Структура Matlab моделі скорегованої системи стабілізації представлена на рис. 4.

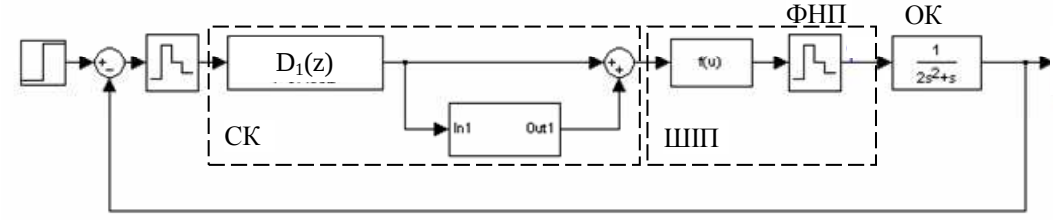


Рис. 4. Matlab модель скорегованої системи стабілізації

Графіки перехідних процесів у системі при використанні різних типів синтезованих корегуючих ланок $D_1(z)$ та різних вхідних впливах (стрибкоподібна зміна та лінійне зростання сигналу завдання) зображені на рис. 5, 6.

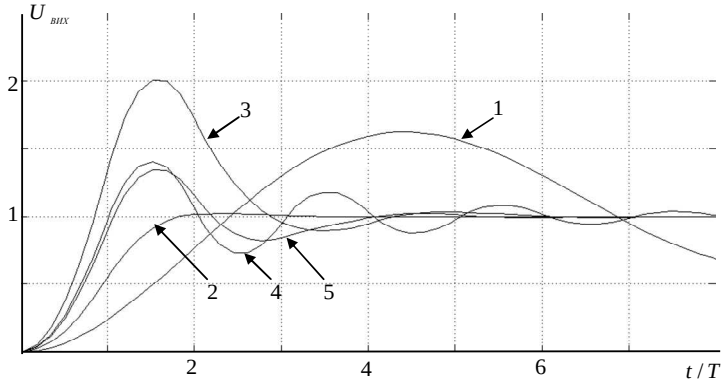


Рис. 5. Діаграми роботи системи стабілізації для стрибкоподібного сигналу завдання: 4,2,3,5 – система налаштована за критерієм грубості, забезпечення астатизму першого, другого порядку, мінімумом сумарної квадратичної оцінки відповідно; 1 – вихідна (нескорегована) система

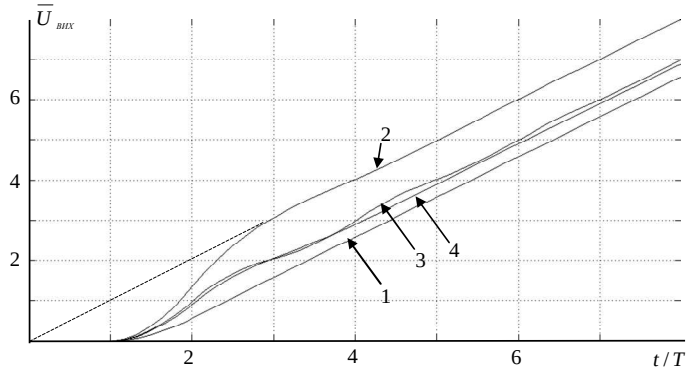
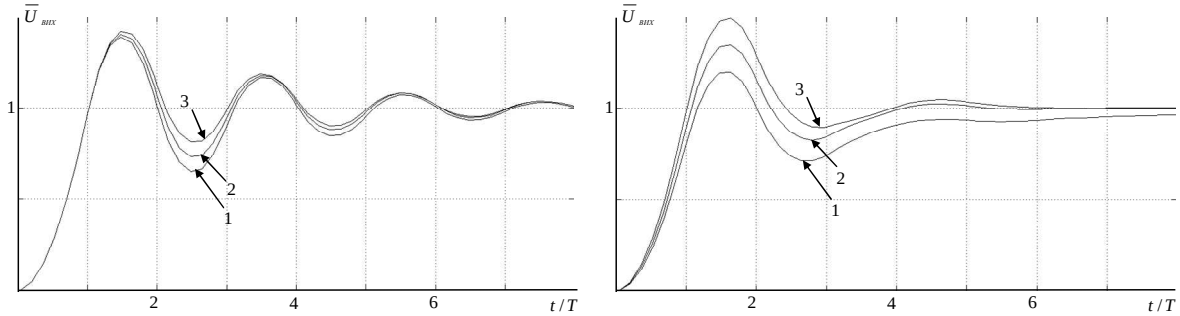


Рис. 6. Діаграми роботи системи стабілізації для лінійно зростаючого сигналу завдання: 3,1,2,4 – система налаштована за критерієм грубості, забезпечення астатизму першого, другого порядку, мінімумом сумарної квадратичної оцінки відповідно



а *б*

Рис. 7. Діаграми роботи системи стабілізації налаштованої за критерієм грубості (а) та мінімуму сумарної квадратичної оцінки (б) при незначній зміни параметрів корегуючої ланки: 1,3 – зменшення та збільшення на 10 % відповідно параметрів регулятора відносно розрахункових значень; 2 – параметри регулятора відповідають розрахунковим значенням

На рис. 5 зображені перехідні процеси у вихідній та скорегованій системах при стрибкоподібній зміні сигналу завдання. Як бачимо з рисунка, тривалість перехідного процесу у вихідній системі в рази більша у порівнянні з скорегованою системою, також спостерігається значний коливальний характер перехідного процесу.

Як бачимо з рис. 5, 6, у скорегованій системі з астатизмом першого порядку тривалість перехідних процесів для обох змін сигналу завдання становить два такти роботи імпульсного елементу, при цьому спостерігається усталене значення похибки за швидкістю (рис. 6). У системі з астатизмом другого порядку тривалість перехідних процесів (рис. 5) становить три такти роботи імпульсного елементу, при цьому усталене значення похибки за швидкістю відсутнє, але спостерігається значне перегулювання (яке досягає близько 100 %), що є недопустимим для певних систем. Усунення значного перегулювання, згідно з [6], можливе за допомогою введення коефіцієнта жорсткості або збільшення відносної тривалості перехідного процесу при накладанні додаткової вимоги оптимальності. Так, на рис. 5, 6 зображені перехідні процеси в оптимальній за швидкодією системі, на яку накладено додаткову умову забезпечення мінімуму сумарної квадратичної оцінки. В цьому випадку тривалість перехідного процесу при стрибкоподібній зміні сигналу завдання становить чотири такти роботи імпульсного елементу, а значення перерегулювання відчутно зменшене і становить близько 30 %. У системі, до якої висувалися вимоги фізичної реалізуємості та грубості, перехідний процес триває лише один такт (якщо брати до уваги значення похибки лише у дискретні моменти часу). Між цими проміжками спостерігаються значні коливання похибки регулювання, які часто можуть бути неприпустимими. Співставлення виразів передатних функцій корегуючих ланок для системи з астатизмом першого порядку (6) та системи з вимогою

грубості (15) показує, що вони відрізняються лише чисельними значеннями коефіцієнтів, а отже, простим перестроюванням коефіцієнтів корегуючої ланки можна значно покращити якість перехідного процесу та позбутися коливань похибки регулювання.

На рис. 7 зображений вплив зміни параметрів корегуючої ланки на перехідний процес у системі, як бачимо з рис. 7, зміна параметрів фізично грубої системи на 10 % не зумовлює істотного впливу на перехідний процес, у той же час, аналогічна зміна параметрів корегуючої ланки для системи оптимальної за сумарною квадратичною оцінкою зумовлює розрегулювання системи, оскільки з'являється усталена похибка.

Висновки. У роботі отримані співвідношення для розрахунку нелінійних дискретних корегуючих ланок оптимальних за швидкодією систем стабілізації напруги з широтно-імпульсною модуляцією першого роду при врахуванні постійної складової вихідної напруги перетворювача, використання яких дозволяє реалізувати грубі системи, системи з астатизмом першого та другого порядків, а також системи з додатковою вимогою оптимальності за мінімумом сумарної квадратичної оцінки.

За отриманими співвідношеннями, для розглянутого прикладу імпульсної системи та переліку додаткових критеріїв, отримані структура та параметри налаштування нелінійних регуляторів. Результати аналітичних розрахунків повністю підтвердилися за допомогою математичного моделювання процесів в оптимізованій системі.

Список використаних джерел

1. *Денисов А. И.* Вентильные преобразователи в системах точной стабилизации / А. И. Денисов, В. М. Зволинский, Ю. В. Руденко. – К. : Наукова думка, 1995. – 250 с.

2. *Денисов Ю. А.* Анализ ошибки системы стабилизации с широтно-импульсной модуляцией при глубоком регулировании / Ю. А. Денисов, Р. В. Заровский // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 6. – С. 19-23.

3. *Дискретные* нелинейные системы / А. Д. Аверина, А. Н. Герасимов, С. П. Забродин и др. ; под ред. Ю. И. Топчеева. – М. : Машиностроение, 1982. – 312 с.

4. *Заровський Р. В.* Аналіз похибки регулювання в системі стабілізації високої точності з використанням функціональних рядів Вольтерра-Вінера / Р. В. Заровський, М. Г. Остапов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2007. – № 28. – С. 229-236.

5. *Заровський Р. В.* Синтез регулятора для систем з широтно-імпульсною модуляцією при врахуванні постійної складової вихідної напруги перетворювача / Р. В. Заровський // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» : наук. зб. – 2013. – № 1 (63). – С. 154-160.

6. *Цыпкин Я. З.* Теория линейных импульсных систем / Я. З. Цыпкин. – М. : Физматгиз,1963. – 968 с.

7. *Цыпкин Я. З.* Теория нелинейных импульсных систем / Я. З. Цыпкин, Ю. С. Попков. – М. : Наука, 1973. – 414 с.

УДК 621.311

А.А. Марченко, канд. техн. наук
Г.О. Труніна, аспірант
А.О. Тимохіна, інженер
Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна

МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

А.А. Марченко, канд. техн. наук
А.А. Трунина, аспирант
А.А. Тимохина, инженер
Национальный технический университет Украины “КПИ”, г. Киев, Украина

МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

A.A. Marchenko, Candidate of Technical Sciences
H.O. Trunina, post-graduate student
A.O. Tymokhina, engineer
National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine

MODEL OF VOLTAGE REGULATOR OF ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK

Розроблено імітаційну модель регулятора напруги з використанням тиристорно-комутованих батарей статичних конденсаторів у програмному середовищі MatLab Simulink. Модель дозволяє дослідити вплив тиристорно-комутованих батарей статичних конденсаторів на регулювання напруги в електричній мережі та запобігти виникненню перехідних процесів під час перемикання конденсаторів. Це позитивно вплине на термін служби конденсаторів, а також підвищить якість електроенергії в цілому.

Ключові слова: *регулювання напруги, імітаційне моделювання, БСК, електрична мережа, перехідні процеси.*

Разработана имитационная модель регулятора напряжения с использованием тиристорно-коммутируемых батарей статических конденсаторов в программной среде MatLab Simulink. Модель позволяет исследовать влияние тиристорно-коммутируемых батарей статических конденсаторов на регулирование напряжения в электрической сети и предотвратить возникновение переходных процессов при переключении конденсаторов. Это положительно повлияет на срок службы конденсаторов, а также повысит качество электроэнергии в целом.

Ключевые слова: *регулирование напряжения, имитационное моделирование, БСК, электрическая сеть, переходные процессы.*

A simulation model of the voltage regulator using thyristor-switched capacitor banks in the software environment MatLab Simulink. The model allows to study the effect of thyristor-switched capacitor banks to control the voltage in the power grid and prevent the occurrence of transients when switching capacitors. This has a positive impact on the life of capacitors, as well as improve the quality of electricity in general.

Key words: *voltage regulation, simulation, battery static capacitors, electric network, the processes of transition.*

Постановка проблеми. Величина напруги в різних точках енергосистеми змінюється залежно від навантаження і схеми мережі. Нормально допустимі та гранично допустимі значення напруги повинні знаходитися в межах ±5 % і ±10 % відповідно від номінальної напруги електричної мережі. Обмеження за найбільшою робочою напругою електрообладнання пояснюються надійністю роботи ізоляції. Збільшення напруги призводить до скорочення терміну дії обладнання, зменшення напруги, і, у свою чергу, знижує продуктивність і економічність функціонування споживачів електричної енергії, пропускну здатність ліній електропередачі та може призвести до порушення стійкості роботи синхронних і асинхронних електродвигунів.

Відомо, що напруга на стороні споживача визначається за формулою [1]:

$$U = U_{цж} - (P_н \cdot R_е + Q_н \cdot X_е) / U_{цж}, \quad (1)$$

де $U_{цж}$ – напруга центра живлення, $P_н$ и $Q_н$ – активна та реактивна потужності навантаження споживача, $R_е$ и $X_е$ – еквівалентний активний і індуктивний опори між центром живлення та споживачем. Із наведеної формули видно, що можна впливати на напругу споживача, змінюючи реактивну потужність $Q_н$. З цією метою використовують при-

строї FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems – гнучкі системи передачі змінного струму), наприклад, статичний синхронний компенсатор (СТАТКОМ) або статичний тиристорний компенсатор (СТК) [2]. Але такі засоби потребують значних капіталовкладень, тому для регулювання напруги доцільним є використання батареї статичних конденсаторів (БСК).

БСК застосовуються для генерації реактивної потужності у вузлах електричної мережі. Вони бувають керовані та некеровані. У некерованих БСК кількість конденсаторів незмінна, а величина реактивної потужності залежить лише від квадрата напруги. У керованих батареях конденсаторів залежно від режиму автоматично або вручну змінюється кількість конденсаторів. При цьому змінюється С-ємність БСК і потужність, що генерується в електричну мережу. Ввімкнення БСК супроводжується кидками струму, а вимкнення – перенапругами, що негативно позначається на терміні служби конденсаторів і комутаційної апаратури. Тому БСК, обладнану вимикачами, не рекомендується вмикати-вимикати більше 2-4 разів за добу. Для обмеження стрибків струму конденсатори перед вмиканням обов'язково повинні бути розряджені за допомогою розрядних резисторів [1; 3].

Для дослідження впливу БСК, що функціонує у складі електричної мережі, на якість напруги енергосистеми, ефективним засобом залишається імітаційне моделювання фрагмента електричної мережі з тиристорно-комутованими БСК з метою підвищення ефективності регулювання напруги у вузлах електричної мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання та дослідження роботи БСК у складі електричної мережі проводиться в різних аспектах. Так, у [4] розроблено модель електричної системи з БСК, підключених до ділянки мережі 6 кВ. Цю модель було використано для дослідження перехідних процесів, що виникають при перемиканні конденсаторів.

У [5] розроблено модель БСК, підключених до ділянки мережі 20 кВ у програмі Electromagnetic Transient Program (EMTP). У наведеній роботі досліджено вплив БСК на роботу електричної мережі при перемиканні конденсаторів, а для вирішення проблеми виникнення перехідних процесів запропоновано використання резисторів та котушок індуктивності з конденсаторами.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Актуальним залишається питання відпрацювання на моделі та створення таких регуляторів для БСК, які запобігають виникненню перехідних процесів при перемиканні конденсаторів та дозволяють дослідити вплив БСК на ефективність регулювання напруги в електричній мережі.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є розроблення імітаційної моделі регулятора напруги з тиристорно-комутованих БСК в електричній мережі, яка б дозволила дослідити вплив моменту комутації батареї конденсаторів на якість напруги в електричній мережі і запобігти виникненню перехідних процесів при комутації конденсаторів.

Виклад основного матеріалу. Модель системи регулювання напруги за допомого БСК була реалізована в програмному середовищі MatLab Simulink [6]. За основу для створення моделі було взято тестову однолінійну схему фрагмента електричної мережі з тиристорно-комутованими БСК (рис. 1), яка складається з автотрансформатора АТДЦТН-125000/330, до обмотки середньої напруги (СН) якого через лінію довжиною 25 км (тип АС-120) підключено силовий трансформатор ТДН-10000/110. До системи автотрансформатор приєднано через повітряну лінію довжиною 45 км (тип проводу АС-240). На стороні нижчої напруги (НН) автотрансформатора через повітряну лінію довжиною 15 км (тип проводу АС-95) підключено навантаження 1,4 МВА, а до сторони НН трансформатора – 7,8 МВА. Під час моделювання навантаження у досліджуваній схемі було незмінним.

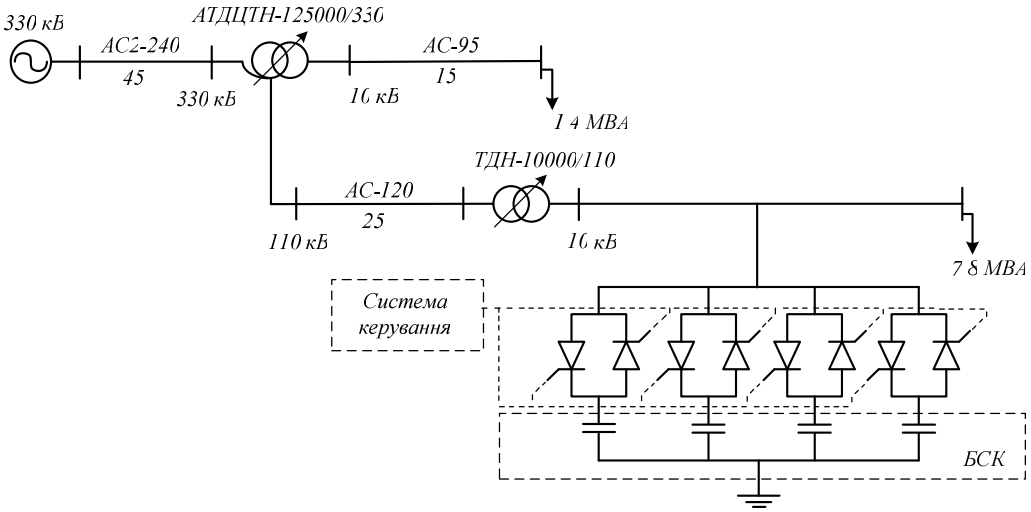


Рис. 1. Однолінійна схема фрагмента електричної мережі з тиристорно-комутованими БСК

Модель фрагмента електричної мережі з тиристорно-комутованими БСК у середовищі MatLab Simulink показано на рис. 2.

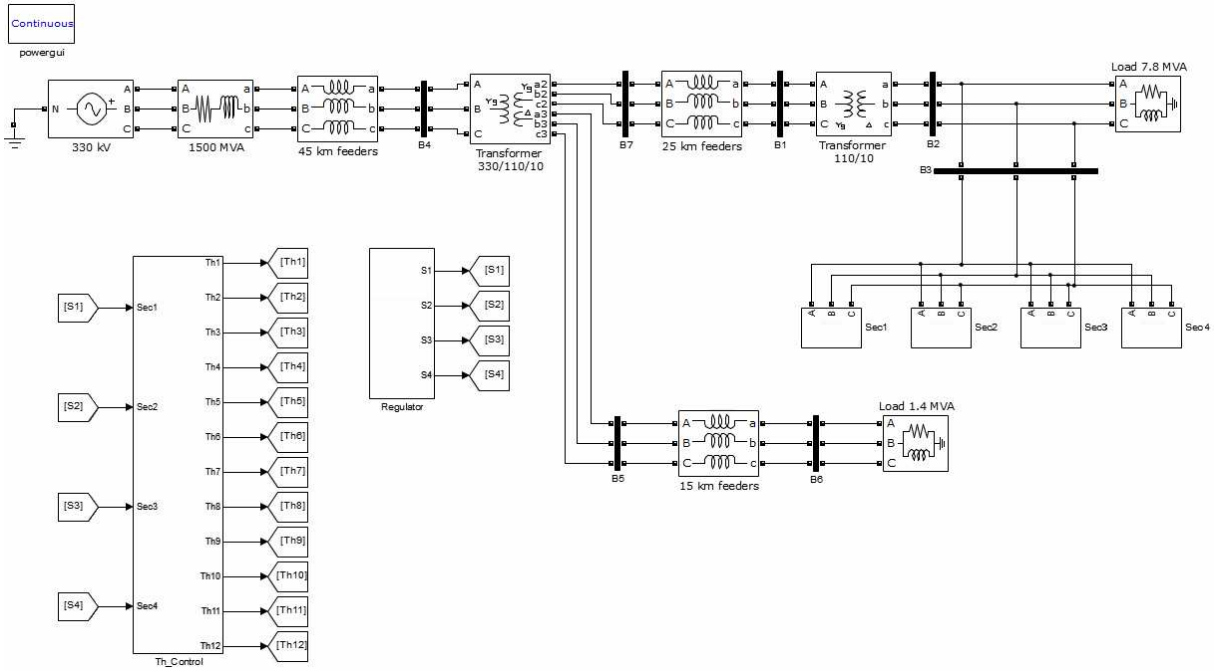


Рис. 2. Модель фрагмента електричної мережі з тиристорно-комутованими БСК

Підсистема «Sec» являє собою батарею статичних конденсаторів. У розгорнутому вигляді структура цієї підсистеми представлена на рис. 3. Керування підсистемою здійснюється перемиканням силових тиристорних ключів [3]. У кожній фазі секції встановлені амперметри (позначення на схемі – Current meter) та вольтметри (позначення на схемі – Voltmeter), від яких інформація про значення струму та напруги в кожній фазі передається в підсистему контролю «Th _Control». Це дає змогу контролювати величину струму в кожній фазі підсистеми «Sec» та здійснювати перемикання тиристорних ключів при переході напруги через нульове значення.

На рис. 4 представлено структуру підсистеми «Regulator», яка формує сигнали ввімкнення або вимкнення підсистем «Sec».

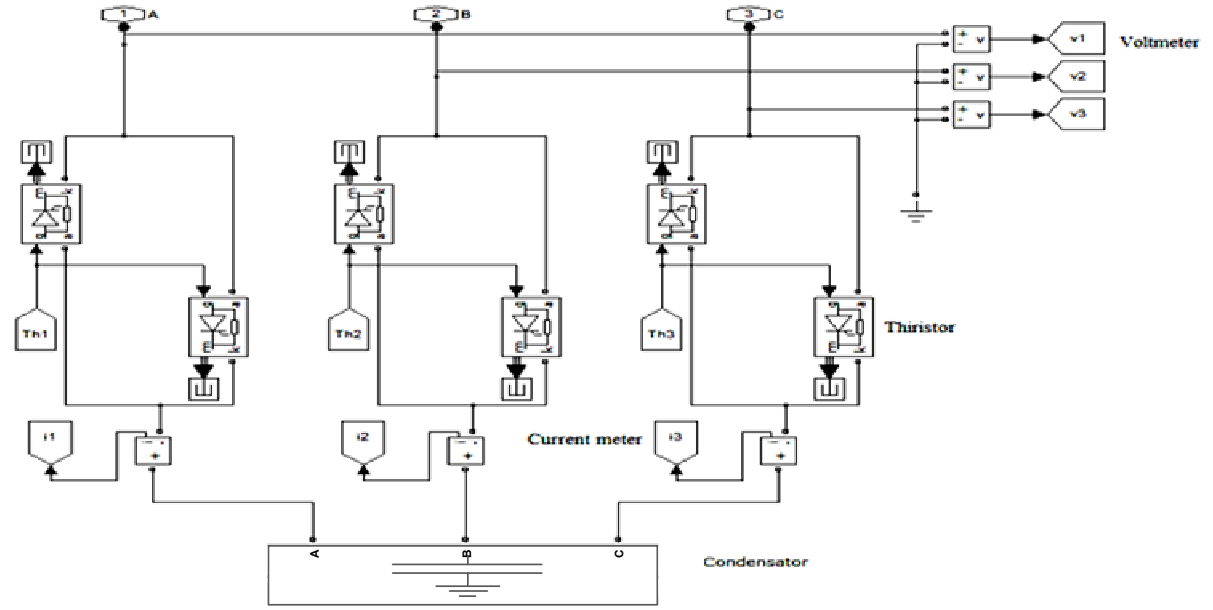


Рис. 3. Підсистема «Sec 1»

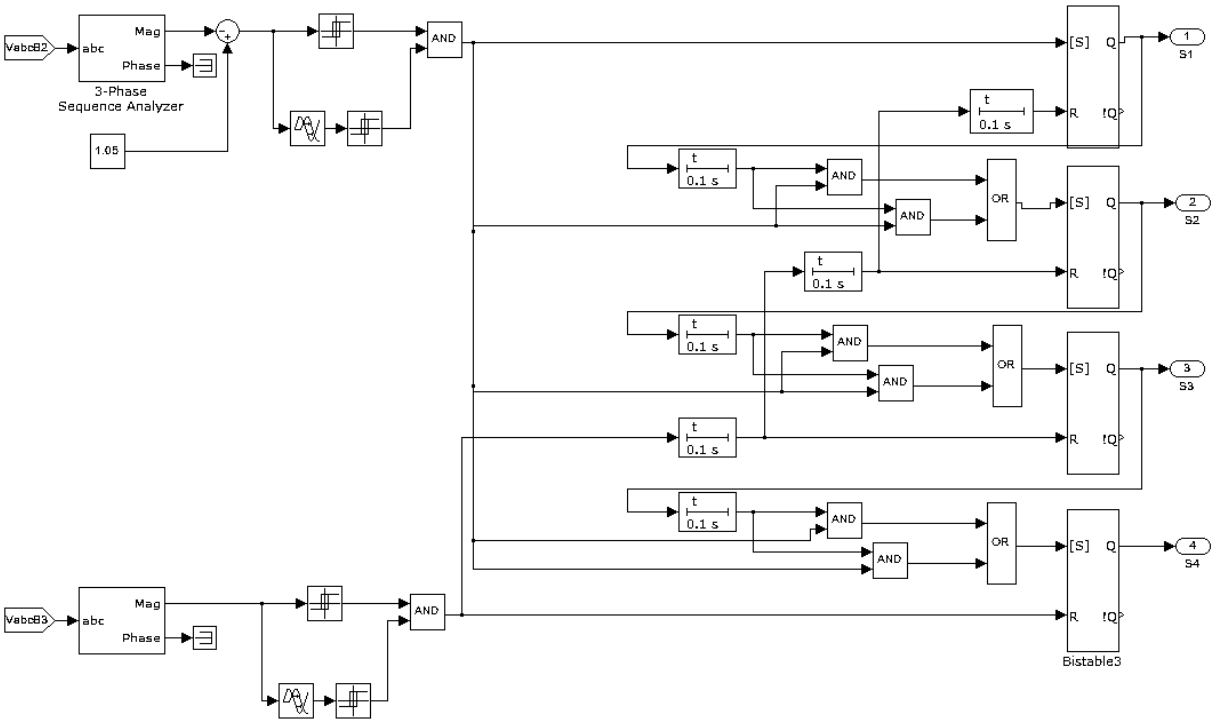


Рис. 4. Підсистема «Regulator»

Моделювання проводилося в режимі максимальних навантажень, тому уставка регулятора становила 1,05 $U_{НОМ}$. Результати моделювання регулятора напруги з тиристорно-комутованими БСК в електричній мережі наведені на рис. 5-8, де показано зміну напруги на шинах В1 і В2 (рис. 2), зміну активної Р, та реактивної Q потужностей на шині В3 (рис. 2), а також струми в комутованих секціях БСК для випадків послідовного вмикання БСК у довільні моменти часу (рис. 5, 6) та під час перемикання секцій при проходженні напруги через нульове значення (рис. 7, 8).

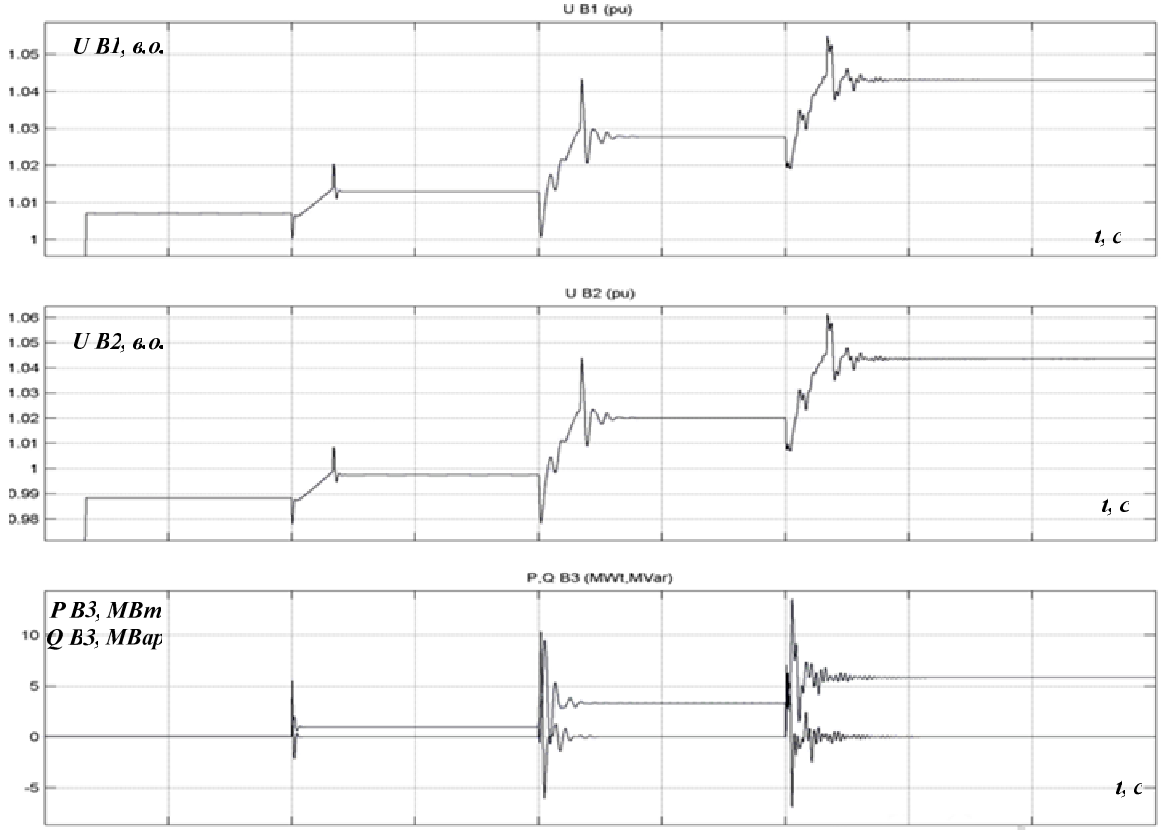


Рис. 5. Зміна напруги на шинах В1 та В2 і потужності на шині В3 при послідовному вмиканні БСК у довільні моменти часу

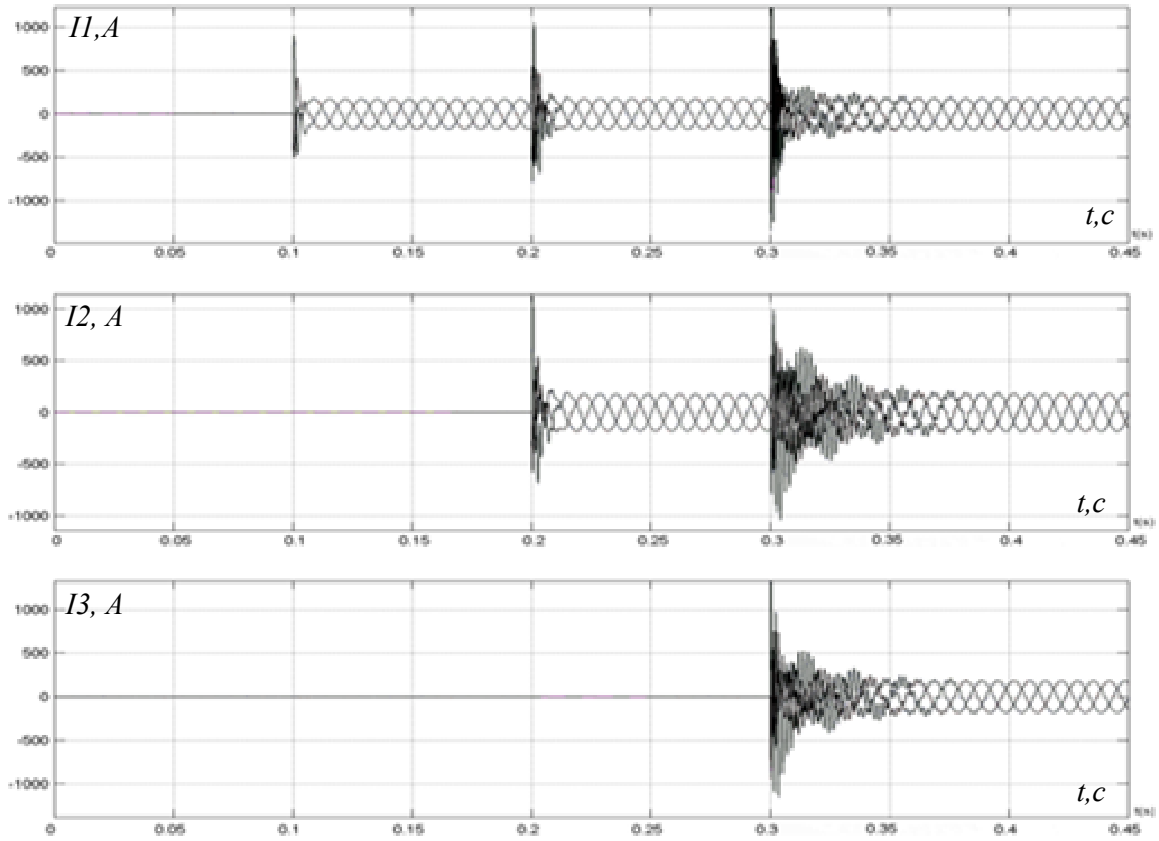


Рис. 6. Трифазні струми в секціях БСК при комутації в довільні моменти часу

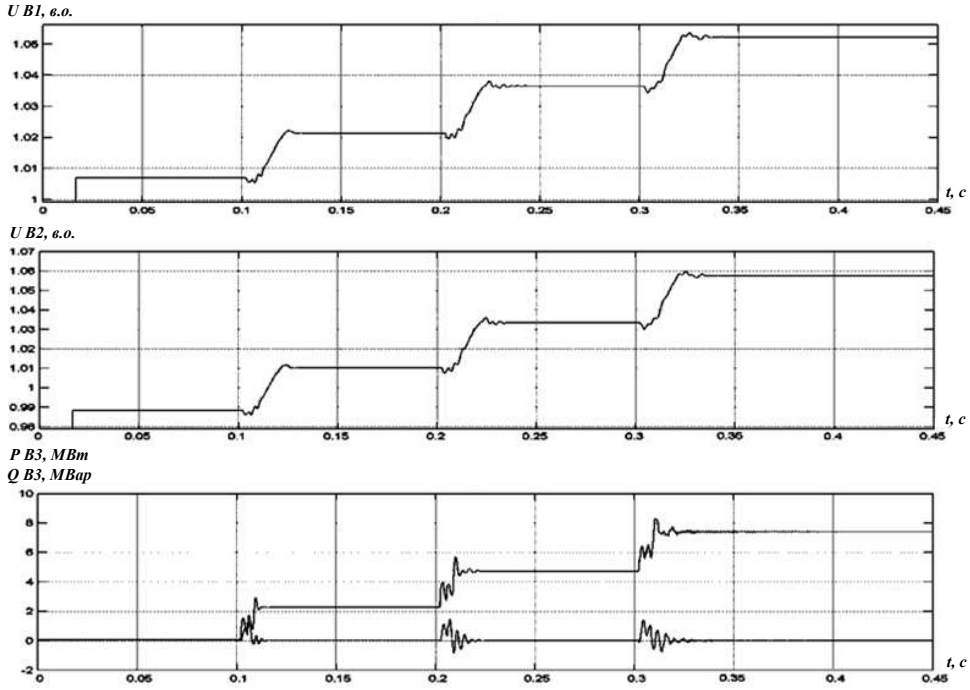


Рис. 7. Зміна напруги на шинах В1 та В2 і потужності на шині В3 при послідовному вмиканні БСК і проходженні напруги через нульове значення

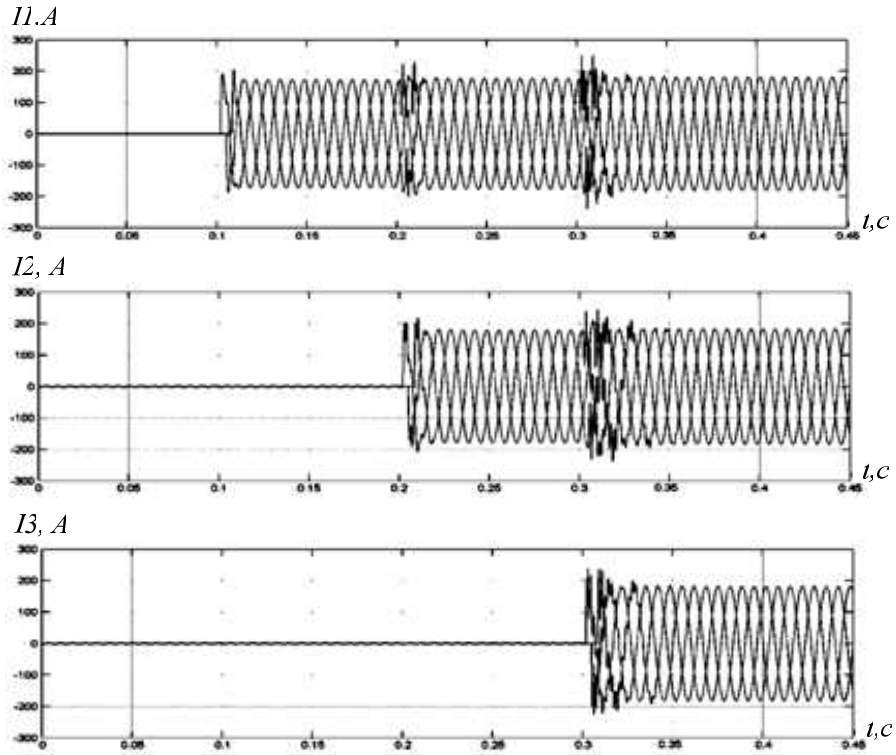


Рис. 8. Трифазні струми в секціях БСК при комутації в моменти часу проходження напруги через нульове значення

Аналізуючи результати, можна побачити, що при відхиленні напруги на шині В2 (рис. 2) за межі зони нечутливості спрацьовує регулятор, послідовно вмикаючи секції БСК для досягнення уставки регулятора 1,05 $U_{НОМ}$ (рис. 5, 7). Перемикання тиристорних ключів при переході напруги через нульове значення не викликає перехідних процесів в електричній мережі, а саме перенапруг та стрибків струму (рис. 7, 8).

Висновки. Застосування розробленої моделі регулятора дозволяє дослідити характер зміни напруги у вузлі електричної мережі та струмів у секціях батарей конденсаторів, а також загальний вплив тиристорно-комутованих БСК на регулювання напруги в електричній мережі.

Розроблена модель регулятора не викликає перехідних процесів при перемиканні конденсаторів, що позитивно вплине на термін служби конденсаторів, а також підвищить якість електроенергії в цілому.

Результати моделювання можуть бути використані при розробленні промислових регуляторів тиристорно-комутованих БСК.

Список використаних джерел

1. *Веников В. А.* Регулирование напряжения в электроэнергетических системах / В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 214 с.

2. *Павловський В. В.* Аналіз та методи управління режимами електричних систем з гнучкими передачами змінним струмом : дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.14.02 / В. В. Павловський. – К., 2010. – 70 с.

3. *Ryszard Strzelecki.* Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks / Ryszard Strzelecki, Grzegorz Benysek. – Springer-Verlag London Limited, 2008. – 414 p.

4. *Mirza Softic.* Measurement, Modeling and Simulation of Capacitor Bank Switching Transients / Mirza Softic, Amir Tokic, Ivo Uglesic // Mathematical Modeling. – 2008. – Vol. 7, Part 1. – P. 1254-1259.

5. *Shehab Abdulwadood Ali.* Capacitor Banks Switching Transients in Power Systems / Shehab Abdulwadood Ali // Energy Science and Technology. – 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 62-73.

6. *Черных И. В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

УДК 519.248:001.89

В.О. Собуцький, канд. техн. наук
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна
В.С. Бура, інженер
Управління з питань НС та ЦЗН Рівненської ОДА, м. Рівне, Україна

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЧО-ПРОМИСЛОВОЇ СИТУАЦІЇ В СИСТЕМІ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ ЯК ЕЛЕМЕНТУ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

В.А. Собуцький, канд. техн. наук
Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, Украина
В.С. Бура, инженер
Управление по вопросам чрезвычайных ситуаций и гражданской защиты населения Ровенской ОГА, г. Ровно, Украина

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРОМЫШЛЕННОЙ СИТУАЦИИ В СИСТЕМЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЕЛЕКТРОСЕТЕЙ КАК ЭЛЕМЕНТА ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

V.O. Sobutskyi, Candidate of Technical Sciences
National University of Water Management and Nature, Rivne, Ukraine
V.S. Bura, engineer
Department of Emergencies and Civil Protection Rivne RSA, Rivne, Ukraine

METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF PRODUCTION-INDUSTRIAL SITUATION IN THE SYSTEM OF MAIN ELECTRIC NETWORKS AS AN ELEMENT OF CITY INFRASTRUCTURE

Пропонується приклад застосування методів системного аналізу й математичного планування експерименту для вирішення проблем експлуатаційної надійності у сфері містобудування. Приведені алгоритми розв'язання типових задач із апріорного ранжирування уражальних чинників джерел техногенних надзвичайних ситуацій, прогнозу-

вання виробничо-промислової ситуації в системі магістральних електромереж і пошуку шляхів реалізації технічних рішень щодо сталого енергопостачання та світломаскування категорованих міст та об'єктів економіки. Розроблена функціональна структура системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту у сфері містобудування містить відповідний математичний апарат для управління виробничо-промисловою ситуацією за критеріями ефективності, а також забезпечує синтез її локальних теорій.

Ключові слова: *інженерно-технічні заходи забезпечення цивільного захисту, магістральні електромережі, аналітично-експертне забезпечення цивільного захисту, виробничо-промислова ситуація, математичне планування експерименту.*

Предлагается пример использования методов системного анализа и математического планирования эксперимента для решения проблем эксплуатационной надежности в сфере градостроительства. Приведены алгоритмы решения типовых задач по априорному ранжированию факторов источников техногенных чрезвычайных ситуаций, прогнозирования производственно-промышленной ситуации в системе магистральных электросетей и поиска путей реализации технических решений по стабильному энергообеспечению и светомаскировке категорированных городов и объектов экономики. Разработана функциональная структура системы инженерно-технических мероприятий обеспечения гражданской защиты в сфере градостроительства содержит соответственный математический аппарат для управления производственно-промышленной ситуацией по критериям эффективности, а также обеспечивает синтез её локальных теорий.

Ключевые слова: *инженерно-технические мероприятия обеспечения гражданской защиты, магистральные электросети, аналитическо-экспертное обеспечение гражданской защиты, производственно-промышленная ситуация, математическое планирование эксперимента.*

It is offered example of the use the methods of the system analysis and mathematical planning the experiment for decision of the problems of the science and technical progress in sphere urban planning. The brought algorithms of the decision of the standard problems on a priori ranking harmful factor of man-caused sources emergency situation, forecasting's production-industrial situation in system of the main electric networks and searching for of the ways to realization of the technical decisions on stable energy provision and blackout category city and object of the economy. Designed functional structure of the system engineering-technical action of the provision of civil protection in sphere urban planning contains the corresponding mathematical device for governing production-industrial situation on criterion of efficiency, as well as provides the syntheses her(its) local theory.

Key words: *engineering-technical actions of the provision of civil protection, main electric networks, analytical-expert provision of civil protection, production-industrial situation, mathematical planning of the experiment.*

Постановка проблеми. З метою створення містобудівних умов щодо реалізації забезпечення сталого функціонування окремих територіально-виробничих комплексів Українським державним НДІ проектування міст „Діпромісто" ім. Ю.М. Білоконя (м. Київ) завершено розроблення пілотного розділу „Інженерно-технічні заходи цивільного захисту" схеми планування території Рівненської області (затверджена рішенням Рівненської обласної ради від 30.03.2012 № 598).

Разом із тим графічні матеріали та пояснювальна записка зазначеного розділу містобудівної документації за складом і змістом не відображають безумовного виконання вимог ДБН В.1.2-4-2006 та ДБН Б.1.1-5-2007, а тому потребують доопрацювання.

Причиною такого стану є відсутність надійних наукових методів аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту, які дозволили б повною мірою врахувати закономірності дії уражальних чинників, що впливають на виробничо-промислову ситуацію, й реалізувати системність у її прогнозуванні. У цьому напрямку великі можливості відкриває метод багатофакторного прогнозування виробничо-промислової ситуації на основі математико-статистичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пізнавальна цінність математичних моделей, як засобу автоматичного керування системою, її глибокого пізнання та створення теорії є предметом активних досліджень науково-дослідних лабораторій Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Практичний інтерес у розв'язуванні будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту, представляють цифрові методи оптимізації, що реалізуються за допомогою сучасних комп'ютерних технологій [1].

На думку французького філософа Е. Мейєрсона (1859-1933), теорія пізнання сутності процесів, що відбуваються в досліджуваних системах, має будуватись не на результатах аналізу думок і тлумачень чисто логічного порядку, а лише відповідно до розгляду та інтуїтивного сприйняття констатацій емпіричного порядку. «Констатація емпіричного»,

згідно з Е. Мейєрсоном, складається із сукупності існуючих наукових результатів та їх історії [2].

Результат усіх закономірностей, яким підпорядковуються дані представленого експерименту побудови математичної моделі виробничо-промислової ситуації в системі магістральних електромереж, із тлумачень, логічно доведених у межах досліджуваної підсистеми аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту, й буде головною метою запропонованого наукового дослідження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Запропонована методологія локальної теорії аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту розглядається в межах представленої концепції науково-практичного забезпечення цивільного захисту, яка опирається на велику кількість експериментальних даних, і полягає в такому: теоретичне вираження системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту вказує на умови, яким мають задовольняти всі рівняння, визначені експериментальними фактами.

Розроблена функціональна структура системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту містить відповідний математичний апарат для управління виробничо-промисловою ситуацією за критеріями ефективності, а також забезпечує синтез її локальних теорій:

– довідково-інформаційного забезпечення (збір та оброблення вихідних даних, зонування територій за характером негативної дії уражальних чинників);

– інженерно-вишукувального забезпечення (пошук та обґрунтування рішень щодо енергопостачання й світломаскування категорованих міст та об’єктів економіки, розміщення підприємств сфери виробництва будівельних конструкцій, виробів і матеріалів, розвитку позаміської зони, інженерного забезпечення);

– проектного забезпечення (планування й забудова міст, населених пунктів і об’єктів економіки з урахуванням вимог Норм проектування інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту);

– аналітично-експертного забезпечення (прогнозування виробничо-промислової ситуації, пошук оптимального варіанта реалізації інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту у сфері містобудування).

Мета статті. Головною метою цієї роботи є залучення об’єктових ланок функціональної підсистеми «Освіта і наука України» єдиної державної системи цивільного захисту до організації, координації і надання допомоги кваліфікованих експертів у проведенні науково-технічних консультацій, експертних оцінювань і модельних експериментів у напрямку вдосконалення системи інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту.

Інженерно-технічні заходи забезпечення цивільного захисту (ІТЗ ЦЗ) – це комплекс прогнозних, аналітично-експертних, інженерно-вишукувальних і проектних робіт та довідково-інформаційних, консультативних і посередницьких послуг, які спрямовані на забезпечення сталого функціонування галузей національної економіки України в особливий період та убезпечення в умовах техногенних надзвичайних ситуацій.

Мета системного підходу до вирішення задач ІТЗ ЦЗ у галузі енергетики полягає в керуванні системою магістральних електромереж (МЕМ) через формулювання мети, виявлення особливостей та параметрів системи, від яких залежить досягнення мети, визначення показників і критеріїв ефективності, побудови математичної моделі та розроблення на її основі алгоритмів і програм визначення оптимальних значень уражальних чинників.

Після вивчення якісної структури досліджуваного процесу, виявлення й виключення чинників, що не чинять істотного впливу на критерії та показники ефективності, установлення обмежень і регульованих чинників, системний аналіз припускає матема-

тичне моделювання, що дозволяє кількісно виразити характер й ступінь впливу окремих елементів системи, а також їх взаємодію.

Викладена локальна теорія аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту (АЕЗ ЦЗ) містить методологію багатофакторного прогнозування виробничо-промислової ситуації (ВПС) у системі МЕМ на основі математико-статистичного моделювання.

Показником І групи задач оптимізації підсистеми АЕЗ ЦЗ є системне прогнозування ВПС, а ІІ групи – пошук оптимального варіанта реалізації ІТЗ ЦЗ у сфері містобудування. Прогнозування ВПС відноситься до числа погано організованих або так званих дифузних підсистем, характерними рисами яких є неможливість чіткого виділення окремих явищ і необхідність урахування багатьох різнорідних чинників. Для дифузних підсистем в умовах неповного знання механізму всіх явищ, що відбуваються в них, особливо ефективним є статистичний і кібернетичний методи дослідження.

Статистичний метод дозволяє розробляти рекомендації з оптимальної поведінки підсистеми в умовах невизначеності, а також представляти експериментальний матеріал у стандартній формі та здійснювати «згортку інформації» у формі аналітичного виразу – рівняння регресії. Це особливо важливо, коли обсяг інформації швидко зростає і необхідне найбільш компактне, а поряд із тим, достатньо повне її викладання.

Кібернетичний метод розкриває, насамперед, функціональні залежності підсистеми від середовища, абстрагуючись від внутрішніх причинно-наслідкових зв’язків, тобто використовує відомий принцип «чорного ящика». Кібернетичному моделюванню властива єдність функціонального підходу та оптимізації як засобу одержання даних для найкращого керування підсистемою.

Математичне планування експерименту (МПЕ) в теорії АЕЗ ЦЗ проводиться в три етапи:

– попереднє вивчення ВПС як об’єкта дослідження (постановка завдання, збір і оброблення апріорної інформації, висування робочої гіпотези; вибір параметрів оптимізації, незалежних змінних і обмежень; попередній експеримент);

– побудова відповідної математичної моделі та її інтерпретація;

– здійснення, при необхідності, технічної реалізації отриманих результатів.

Завдання математичного моделювання ВПС зводиться до одержання залежності, що характеризує зв'язок між параметром оптимізації $(R_{У.В}^{0}/q^{1/3})$ і незалежними змінними X_k (чинниками), яку можна аналітично представити у вигляді функції:

$$R_{У.В}^{0}/q^{1/3} = \varphi(H/q^{1/3}, q, X_м, ..., X_k), \text{ м/т}^{1/3}; \quad (1)$$

де $R_{У.В}^{0}/q^{1/3}$ – наведений радіус зони виходу з ладу об’єкта системи за ударною хвилею

$$R_{У.В}^{0}/q^{1/3} = \sum_{i=1}^{10}(H/q^{1/3})_i + q + X_м \to max, \text{м/т}^{1/3}; \quad (2)$$

$H/q^{1/3}$ – наведена висота ядерного вибуху *i*-го виду з урахуванням умовної потужності вибуху (q) або інших незалежних змінних

$$40 \geq H/q^{1/3} \geq (-40), \text{ м/т}^{1/3}; \quad (3)$$

q – калібр ядерного боєприпасу

$$q = 10^8 = \text{const, т}; \quad (4)$$

$X_м$ – метеоумови середньої смуги (відкрита місцевість, літо, дуже слабка мряка, видимість 1-2 км);

X_k – незалежні змінні І групи задач оптимізації підсистеми АЕЗ ЦЗ;

n – кількість видів ядерних вибухів, за їх висотою (глибиною) від поверхні землі (води) та характеристик середовища.

Для якісного виконання завдань із прогнозування ВПС необхідно розрахувати значення величини приведеного радіусу зони виходу з ладу об’єкта системи МЕМ

$(R_{У.В}^{0}/q^{1/3})$ за дією всіх уражальних чинників, із прив'язкою до домінуючого – надмірного тиску у фронті повітряної ударної хвилі $(\Delta p_ф)$:

$$\Delta p_ф \rightarrow \min, \text{ кг/см}^2. \quad (5)$$

Невідома функція відгуку адекватно описується поліноміальним рівнянням другого порядку:

$$R_{У.В}{}^{0} / q^{1/3} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{11} \beta X_i + \sum_{i=1}^{11} \beta_i X_i{}^{2} + \sum_{i \neq j}^{11} \beta_{ij} X_i X_j + ..., \text{ м/т}^{1/3}. \quad (6)$$

Вид і показник степеня полінома вибираються або на підставі теоретичного аналізу, або апріорі, а потім уточнюються статистично. Оцінки коефіцієнтів регресії (β) поліноміальних моделей можуть бути знайдені на основі експерименту.

Відповідно до сучасної математичної теорії експерименту найбільш вдале поєднання статистичного й кібернетичного підходів до дослідження складних дифузних підсистем має місце в методах МПЕ, що на цей час досить добре розроблені стосовно різних галузей науки і техніки, у тому числі й будівельних технологій.

Якщо на стадії одержання математичних моделей дифузних підсистем можливе абстрагування від складних причинно-наслідкових зв'язків, то далі аналіз моделей дозволяє значною мірою розкрити ці зв'язки і дослідити сутність процесів, що відбуваються в підсистемі.

Пізнавальна цінність математичних моделей полягає у тому, що вони є засобом не тільки автоматичного керування підсистемою АЕЗ ЦЗ, але й засобом її глибокого пізнання та створення теорії [1].

Результат усіх закономірностей, яким підпорядковуються дані представленого експерименту побудови математичної моделі ВПС, із тлумачень, логічно доведених у межах досліджуваної системи, й складає головну мету наукового дослідження.

На основі апріорної інформації на першому етапі МПЕ відібрано 11 чинників, що чинять вплив на ВПС у системі МЕМ. Для ранжирування уражальних чинників застосували метод формалізації згідно з літературними даними.

За результатами ранжування методом формалізації відповідно до літературних даних побудовано середню апріорну діаграму рангів впливу розглянутих чинників на ВПС у системі МЕМ при обраних межах їх зміни (рис.).

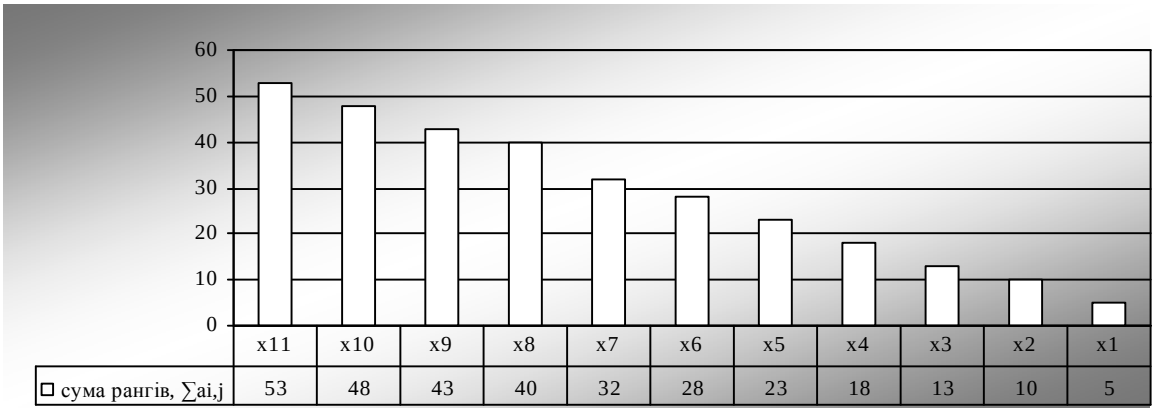


Рис. Середня апріорна діаграма рангів впливу чинників на ВПС

Аналіз діаграми рангів показує, що розподіл чинників є нерівномірним і близьким до експоненціального. Це дозволяє виділити безперечно основні уражальні чинники, а частину віднести до так званого «шумового поля». До таких найбільш суттєвих чинників, що впливають на ВПС у системі МЕМ можна віднести: надмірний тиск у фронті повітряної ударної хвилі $(\Delta P_ф)$, тиск сейсмовибухових і сейсмічних хвиль у ґрунті (σ), а

також тиск у фронті підводної ударної хвилі (p_m). Найбільш слабким чинником за літературними даними стала часова функція напруженості електричного поля ($E(t)$).

На другому етапі МПЕ вибираємо основні критерії оптимізації вихідного параметра ($R_{У.В}^0/q^{1/3}$) підсистеми АЕЗ ЦЗ в системі МЕМ, а саме:

C_p^0 – ступінь руйнування об'єкта;

p^0 – ймовірність ураження об'єкта, %;

$к^0$ – коефіцієнт послаблення випромінювання захисною товщею об'єкта;

Q_n^0 – середня густина радіоактивного забруднення поверхонь об'єкта, розп/хв·см^2;

c_φ – коефіцієнт опору тиску газового потоку захисної товщи об'єкта;

N_e – концентрація електронів у місці підвищеної іонізації, 1/см^3;

$E^B_{МАКС}$ – максимальне значення вертикальної складової напруженості електричного поля, В/м,

визначені експериментальним шляхом залежно від потужності та висоти вибуху, віддалення об'єкта від центру (епіцентру) вибуху, розміру й стійкості об'єкта до дії уражальних чинників, його розташування на місцевості, метеорологічних умов, характеру рельєфу місцевості тощо [3].

Сукупність усіх значень, які може приймати чинник у межах експерименту, називають його областю варіювання. У матриці планування (таблиці планових експериментів) чинники даються в кодованому вигляді. При цьому за основний рівень варіювання приймають центральну, тобто нульову точку і позначають її (X_{io}), а інтервал варіювання – (ΔX_i). За допомогою додавання або віднімання значення інтервалу варіювання від значення чинника, що знаходиться на основному рівні, одержують відповідно верхній, що позначається (+1) або (+), або нижній, що позначається (-1) або (-), рівень чинника.

Взаємозв'язок між натуральними (X_i) і кодованими значеннями чинників (x_i) визначають за формулою:

$$x_i = (X_i - X_{io})/\Delta X_i. \qquad (7)$$

Вибір інтервалів варіювання залежить від цілей і можливостей дослідження, а також від конкретних умов проведення експерименту, які зводяться у спеціальну таблицю.

Таблиця

Умови планування експерименту побудови математичної моделі ВПС у системі МЕМ

№ з/п	Чинники		Рівні варіювання			Інтервал варіювання, ΔXi, натур. вим.
	натуральний вигляд	кодований вигляд	-1	0	+1	
1	2	3	4	5	6	7
1	Надмірний тиск у фронті повітряної ударної хвилі ($\Delta p_ф$), кг/см^2	x_1	0,3	0,35	0,4	0,05
2	Тиск сейсмовибухових і сейсмічних хвиль у ґрунті (σ), кг/см^2	x_2	0,2	0,25	0,3	0,05
3	Тиск у фронті підводної ударної хвилі (p_m), кг/см^2	x_3	30	185	340	155
4	Світловий імпульс випромінювання (u), кал/см^2	x_4	50	210	370	160
5	Сумарна доза проникної радіації за захисною товщею (D_x), р	x_5	$1{,}1\cdot10^{-18}$	$2{,}1\cdot10^{-16}$	$4{,}3\cdot10^{-16}$	$2{,}1\cdot10^{-16}$
6	Сумарний потік нейтронів ($П_n$), нейтр/см^2	x_6	0	$5\cdot10^{11}$	10^{12}	$5\cdot10^{11}$
7	Імпульс тиску рентгенівського випромінювання ($I_д$), кг·сек/см^2	x_7	0,046	0,058	0,070	0,012
8	Рівень радіації (P), р/год	x_8	24184	255370	486556	231186

Закінчення табл.

1	2	3	4	5	6	7
9	Імпульс тиску газового потоку (I_∂), кг·сек/см^2	x_9	168,90	168,925	168,95	0,025
10	Концентрація електронів у місці підвищеної іонізації (N_e), 1/см^3	x_{10}	0	$0{,}9\cdot10^5$	$1{,}8\cdot10^5$	$0{,}9\cdot10^5$
11	Часова функція напруженості електричного поля $(E(t))$, В/м	x_{11}	62	372	682	310

Для побудови лінійних залежностей застосовуються дворівневі, а для квадратичних – трирівневі плани й плани з більшою кількістю рівнів.

Результати дослідів обробляють за допомогою методів математичної статистики, одержуючи залежності між вихідними параметрами й чинниками, що на них впливають, у вигляді лінійних або неповних квадратичних рівнянь регресії.

Таким чином, отримуємо математичну модель ВПС у системі МЕМ:

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = \varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6) + f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}),\ \text{м/т}^{1/3}, \quad (8)$$

або

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = \varphi(\Delta p_\phi, \sigma, u, D_x, П_n) + f(I_\partial, P, I_\partial, N_e, E(t)),\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (9)$$

Якщо функції $\varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6)$, $f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11})$ задані на відрізку $[a,b]$ і мають певні наперед визначені властивості, у такому випадку можна стверджувати, що отримано функціональний простір ВПС, елементами (точками, векторами) якого є функції.

Наявність у функціональному просторі ВПС числа $||R_{У.В}{}^0/q^{1/3} - x||$, яке має властивості звичайної відстані

$$||R_{У.В}{}^0/q^{1/3} - 0|| = ||R_{У.В}{}^0/q^{1/3}|| \geq 0,\ \text{м/т}^{1/3}; \quad (10)$$

$$||R_{У.В}{}^0/q^{1/3}|| = 0 \rightarrow \varphi(x) = f(x) \equiv 0,\ \text{м/т}^{1/3}; \quad (11)$$

$$||a\ R_{У.В}{}^0/q^{1/3}|| = |a|\cdot||R_{У.В}{}^0/q^{1/3}||,\ \text{м/т}^{1/3}; \quad (12)$$

$$||R_{У.В}{}^0/q^{1/3} + x|| \leq ||R_{У.В}{}^0/q^{1/3}|| + ||x||,\ \text{м/т}^{1/3}, \quad (13)$$

дає можливість звичайним методом визначити межі елементів зазначеного простору – ε–межею елементу $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$ є множина елементів $(R_{У.В}/q^{1/3})$ цього простору, таких що

$$||R_{У.В}/q^{1/3} - R_{У.В}{}^0/q^{1/3}|| < \varepsilon,\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (14)$$

Якщо ВПС – функціональний простір із введеним на множині його елементів відстанню $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$, а також якщо задано правила φ та f, відповідно до яких кожному елементу $(R_{У.В}/q^{1/3})$ деякої підмножини $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$ $\underline{C}$ ВПС поставлене у відповідність число.

$$(\varphi + f) : R_{У.В}{}^0/q^{1/3} \rightarrow X,\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (15)$$

У випадку використання МПЕ параметр $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$ (невідомої функції відгуку) представляємо поліномами:

– функціональної залежності φ

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = \beta_0 + \beta_1\Delta p_\phi + \beta_{11}\Delta p_\phi{}^2 + \beta_{12}\Delta p_\phi\sigma + \beta_{14}\Delta p_\phi u + \beta_{15}\Delta p_\phi D_x +$$
$$+ \beta_{16}\Delta p_\phi П_n + \beta_2\sigma + \beta_{22}\sigma^2 + \beta_{24}\sigma u + \beta_{25}\sigma D_x + \beta_{26}\sigma П_n + \beta_4 u + \beta_{44}u^2 +$$
$$+ \beta_{45}uD_x + \beta_{46}uП_n + \beta_5 D_x + \beta_{55}D_x{}^2 + \beta_{56}D_xП_n + \beta_6 П_n + \beta_{66}П_n{}^2,\ \text{м/т}^{1/3}, \quad (16)$$

де $R_{У.В}{}^0/q^{1/3}$ – параметр оптимізації, тобто вихідний параметр системи;

Δp_ϕ, σ, u, D_x, $П_n$ – незалежні змінні цієї ж системи;

β_0, β_1, β_{11}, β_{12}, β_2, $\beta_{22...}$ – теоретичні коефіцієнти регресії;

– функціональної залежності f

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = \beta_0 + \beta_7 I_\partial + \beta_{77}I_\partial{}^2 + \beta_{78}I_\partial P + \beta_{79}I_\partial I_\partial + \beta_{710}I_\partial N_e +$$
$$+ \beta_{711}I_\partial E(t) + \beta_8 P + \beta_{88}P^2 + \beta_{89}PI_\partial + \beta_{810}PN_e + \beta_{811}PE(t) + \beta_9 I_\partial + \beta_{99}I_\partial{}^2 +$$

$$+ \beta_{910} I_\partial N_e + \beta_{911} I_\partial E(t) + \beta_{10} N_e + \beta_{1010} N_e^2 + \beta_{1011} N_e E(t) + \beta_{11} E(t) + \beta_{1111} E(t)^2, \text{ м/т}^{1/3}, \quad (17)$$

де $R_{У.В}{}^0/q^{1/3}$ – параметр оптимізації, тобто вихідний параметр системи;

I_∂, P, I_∂, N_e, $E(t)$ – незалежні змінні цієї ж системи;

β_0, β_7, β_{77}, β_{78}, β_8, $\beta_{88...}$ – теоретичні коефіцієнти регресії.

Будемо стверджувати, що задано функціонал, область визначення якого є множина $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3}) \subset$ ВПС.

Функціонал $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$ називається лінійним, якщо він визначений на всій множині ВПС, неперервний у кожній точці, а також має ознаку адитивності, тобто для довільних чинників x виконується рівність

$$R_{У.В}{}^0/q^{1/3} = L\,(x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11}) =$$
$$= \varphi(x_1, x_2, x_4, x_5, x_6) + f(x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}), \text{ м/т}^{1/3}. \quad (18)$$

Якщо Ω – обмежена область ВПС в R^n з кусочно-гладкою межею $\partial\Omega$. Координати об'єктів в R^n будемо позначати літерою x, розуміючи під цим символом вектор-стовпчик із компонентами x_i, $i = 1, 2, \ldots, 11$. Для градієнта функції $\varphi(x)$ або $f(x)$ – вектор-стовпчика її частинних похідних $\partial\varphi(x)/\partial x_i$, φ_{xi} – приймається позначення $grad\ \varphi(x)$.

Для будь-яких гладких $\varphi(x)$ або $f(x)$, які обертаються в нуль на межі області, маємо те, що в точці екстремуму $(R_{У.В}{}^0/q^{1/3})$ виконується співвідношення, яке називається рівнянням Ейлера-Остроградського:

$$L_{\varphi, f}(x, j, f\ grad_{\varphi, f}) - \sum_{i=1}^{n} \partial L_{\varphi, fxi} / \partial x_i = 0, \text{ м/т}^{1/3}. \quad (19)$$

Крайова задача для цього рівняння з межовою умовою

$$\varphi(x)|_{x \in \partial\Omega} = f(x)|_{x \in \partial\Omega} = \psi(\omega), \text{ м/т}^{1/3} \quad (20)$$

є необхідною умовою екстремуму в цій задачі [4].

При постановці найпростіших завдань або на першій стадії дослідження отримуємо рівняння регресії першого ступеня або неповні квадратичні рівняння (*регресія* – форма зв'язку між випадковими величинами). Розв'язання більшості оптимізаційних задач пов'язане, звичайно, із використанням поліномів другого порядку. Поліноміальні залежності третього порядку на практиці вирішення будівельно-технологічних задач практично не застосовуються.

У результаті експериментів визначають коефіцієнти регресії b_0, b_1, b_{11}, b_{12}, b_2, $b_{22\ ...}$, які є оцінками теоретичних коефіцієнтів. Після цього рівняння (16), (17) набувають вигляду:

– функціональної залежності φ

$$R\hat{}_{У.В}{}^0/q^{1/3} = b_0 + b_1 \Delta p_\phi + b_{11} \Delta p_\phi^2 + b_{12} \Delta p_\phi \sigma + b_{14} \Delta p_\phi u + b_{15} \Delta p_\phi D_x +$$
$$+ b_{16} \Delta p_\phi \Pi_n + b_2 \sigma + b_{22} \sigma^2 + b_{24} \sigma u + b_{25} \sigma D_x + b_{26} \sigma \Pi_n + b_4 u + b_{44} u^2 +$$
$$+ b_{45} u D_x + b_{46} u \Pi_n + b_5 D_x + b_{55} D_x^2 + b_{56} D_x \Pi_n + b_6 \Pi_n + b_{66} \Pi_n^2, \text{ м/т}^{1/3}, \quad (21)$$

де $R\hat{}_{У.В}{}^0/q^{1/3}$ – розрахункове значення параметра оптимізації;

Δp_ϕ, σ, u, D_x, Π_n – незалежні змінні системи;

b_0, b_1, b_{11}, b_{12}, b_2, $b_{22...}$ – розрахункові коефіцієнти регресії;

– функціональної залежності f

$$R\hat{}_{У.В}{}^0/q^{1/3} = b_0 + b_7 I_\partial + b_{77} I_\partial^2 + b_{78} I_\partial P + b_{79} I_\partial I_\partial + b_{710} I_\partial N_e +$$
$$+ b_{711} I_\partial E(t) + b_8 P + b_{88} P^2 + b_{89} P I_\partial + b_{810} P N_e + b_{811} P E(t) + b_9 I_\partial + b_{99} I_\partial^2 +$$
$$+ b_{910} I_\partial N_e + b_{911} I_\partial E(t) + b_{10} N_e + b_{1010} N_e^2 + b_{1011} N_e E(t) + b_{11} E(t) + b_{1111} E(t)^2, \text{ м/т}^{1/3}, \quad (22)$$

де $R\hat{}_{У.В}{}^0/q^{1/3}$ – розрахункове значення параметра оптимізації;

I_∂, P, I_∂, N_e, $E(t)$ – незалежні змінні системи;

b_0, b_7, b_{77}, b_{78}, b_8, $b_{88...}$ – розрахункові коефіцієнти регресії.

Дослідні розрахунки виконували за основними критеріями оптимізації вихідного параметра $(R^{\wedge}{}_{y.B}{}^{0}/q^{1/3})$ підсистеми АЕЗ ЦЗ у системі МЕМ, визначеними експериментальним шляхом залежно від потужності та висоти вибуху, розміру й стійкості об'єкта до дії уражальних чинників, його розташування на місцевості відповідно до плану ПФЕ 2^4. У кожній точці плану розрахунок незалежних змінних у системі МЕМ по кожному *i*-му виду уражального чинника, виконували оперуючи емпіричними даними [3].

З урахуванням значимості коефіцієнтів математична модель ВПС в системі МЕМ (у кодованому виразі змінних) буде мати вигляд:

$$R^{\wedge}{}_{y.B}{}^{0}/q^{1/3} = 15{,}95 + 5{,}5(1/x_1) + x_7 + \ln x_{10} - x_7 \ln x_{10} - (1/x_8)\ln x_{10},\ \text{м/т}^{1/3}. \quad (23)$$

На другому етапі перевіряється гіпотеза про адекватність (відповідність експериментальним даним) поліноміальної моделі з усіма значимими коефіцієнтами регресії. При цьому використовується мінімізуюча сума квадратів, що називається в регресивному аналізі залишковою. Для перевірки адекватності формулюється нуль-гіпотеза, і якщо вона за критерієм Фішера *(F)* буде визнана правдоподібною, то модель описує процес адекватно експерименту. З інженерного погляду це означає, що модель передбачає результати $(R^{\wedge}{}_{y.B}{}^{0}/q^{1/3})$ в середньому з похибкою, більшою в $\sqrt{F}$ разів, аніж експериментальна. Оскільки $F_p < F_m$, тому отримане рівняння регресії є адекватним і його можна використовувати для побудови номограм.

На основі отриманих даних будується номограма, за якою можна розрахувати значення $(R^{\wedge}{}_{y.B}{}^{0}/q^{1/3})$ при визначених значеннях x_1, x_7, x_8, x_{10} і варійованих чинників.

У прямокутній декартовій системі координат *0xyz*, за допомогою комп'ютерних програм, поверхня відгуку двофакторної квадратичної (повної) моделі ВПС в системі МЕМ, залежно від значення коефіцієнтів b_i,, b_{ii}, b_{ij}, схематично зображається у вигляді гіперболічного параболоїду.

Результати експертного оцінювання працездатності системи МЕМ, проведеного при аналізованій довірчій імовірності виходу з ладу її об'єктів – 95 % (показник α-імовірності відмови – 0,05) і кількості степенів свободи, визначених умовами експерименту, свідчать про неможливість забезпечення експлуатаційної надійності будівельних конструкцій системи в цілому в межах зони, радіус якої удвічі перевищує нормативне значення віддаленості меж зон можливих руйнувань від меж проектної забудови категорованих міст [5].

Метод розрахунку конструкцій за допустимим станом може стати продовженням методу МПЕ. При розрахунках зазначеним методом чітко встановлюється допустимий стан конструкцій та використовується система розрахункових коефіцієнтів, уведення яких гарантує, що такий стан не відбудеться за найбільш несприятливої взаємодії навантажень і при найменших значеннях міцнісних характеристик матеріалів. Міцність перерізів визначають за стадією руйнування, проте безпечність роботи конструкції під навантаженням оцінюють не одним синтезованим коефіцієнтом запасу, а зазначеною системою розрахункових коефіцієнтів. Конструкції, запроектовані та розраховані за методом допустимого стану, отримуються більш економічними [6].

Висновки і пропозиції. Проведення експериментів щодо вивчення впливу певних чинників на стан об'єктів за допомогою математичних методів планування дозволило отримати результат у вигляді рівняння (математичної моделі), яка з певною статистично обґрунтованою ймовірністю адекватно описує реальний процес. Довідково-інформаційна база даних результатів експериментів, проведених за допомогою математичних методів планування, у перспективі може бути використана при розробленні автоматизованих систем виконання інженерно-технічних заходів забезпечення цивільного захисту. При неавтоматизованому методі розрахунку – можуть бути використані номограми.

Окремої уваги потребує питання розроблення та впровадження нормативного регулювання системи сертифікації фахівців з питань аналітично-експертного забезпечення цивільного захисту у сфері містобудування.

Список використаних джерел

1. *Дворкін Л. Й.* Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту : навчальний посібник / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, В. В. Житковський. – Рівне : НУВГП, 2011. – 174 с.
2. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов / А. Эйнштейн. – М. : Наука, 1965. – Т. 4. – 599 с.
3. *Боевые* свойства ядерного оружия. – М. : Воениздат, 1967. – 624 с.
4. *Вся* высшая математика : учебник / М. Л. Краснов, А. И. Киселёв, Г. И. Макаренко, Е. В. Шикин, В. И. Заляпин, С. К. Соболев. – М. : Эдиториал УРСС, 2003. – Том 6. – 256 с.
5. *Інженерно-технічні* заходи цивільного захисту (цивільної оборони). Система надійності та безпеки в будівництві: ДБН В.1.2-4-2006. – К. : Мінбуд України, 2006. – 34 с.
6. *Байков В. Н.* Железобетонные конструкции. Общий курс : учебник для вузов / В. Н. Байков, Е. Є. Сигалов. – М. : Стройиздат, 1991. – 767 с.: ил.
7. *Собуцький В. О.* Експлуатаційна надійність міських будівель і споруд: основи теорії і практика : монографія / В. О. Собуцький, О. В. Собуцький. – Рівне : НУВГП, 2013. – 225 с.

УДК 621.3.05

С.Ю. Шевченко, канд. техн. наук
О.М. Довгалюк, канд. техн. наук
О.Є. Піротті, канд. техн. наук
НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГИ В МЕРЕЖАХ 6-35 КВ

С.Ю. Шевченко, канд. техн. наук
О.Н. Довгалюк, канд. техн. наук
А.Е. Пиротти, канд. техн. наук
НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТЯХ 6-35 КВ

S.Y. Shevchenko, Candidate of Technical Sciences
O.N. Dovgalyuk, Candidate of Technical Sciences
A.Ye. Pirotti, Candidate of Technical Sciences
NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

PECULIARITIES THE CHOICE OF SURGE ARRESTERS IN NETWORKS 6-35 KV

Розглянуто основні вимоги до вибору обмежувачів перенапруги в мережах 6-35 кВ за такими характеристиками: найбільша робоча напруга, номінальний розрядний струм, питома енергоємність, залишкові напруги для захисту від комутаційних та грозових перенапруг, місце встановлення обмежувача перенапруги та забезпечення умов вибухобезпечності.

Ключові слова: *обмежувач перенапруги, електрична мережа, найбільша робоча напруга, залишкова напруга.*

Рассмотрены основные требования к выбору ограничителей перенапряжения в сетях 6-35 кВ по таким характеристикам: наибольшее рабочее напряжение, номинальный разрядный ток, удельная энергоемкость, остающиеся напряжения для защиты от коммутационных и грозовых перенапряжений, место установки ограничителя перенапряжения и обеспечение условий взрывобезопасности.

Ключевые слова: *ограничитель перенапряжения, электрическая сеть, наибольшее рабочее напряжение, остающееся напряжение.*

The main requirements are considered for the selection of surge arresters in networks 6-35 kV for such characteristics: continuous operating voltage, the nominal discharge current, energy intensity, impulse residual voltage to protect against commutation and lightning surges, place of setting a surge arrester and to provide conditions explosion safety.

Key words: *surge arrester, electric network, continuous operating voltage, impulse residual voltage.*

Постановка проблеми. Розподільні електричні мережі напругою 6-35 кВ охоплюють значну територію України, мають складну розгалужену структуру і виконують функції розподілу та передавання електроенергії безпосередньо до споживачів. Пошкодження у розподільчих мережах призводять до збитків, пов'язаних з перервами в електропостачанні споживачів. Однією з причин таких пошкоджень є грозові або комута-

ційні перенапруги, які спричиняють вихід з ладу ізоляторів, опор, проводів, мережевого устаткування, призводять до замикань на землю, дугових перенапруг та автоматичних вимкнень ліній. Таким чином, надійність електропостачання споживачів значною мірою залежить від ефективності грозозахисних заходів.

Основним видом захисних апаратів, що застосовуються в мережах 6-35 кВ, є обмежувачі перенапруги (ОПН). На сьогодні багато питань, пов'язаних з вибором та експлуатацією ОПН, не знаходять достатнього відображення в нормативних документах. При виборі ОПН необхідно враховувати технічні характеристики ОПН, параметри мережі та захищуваного обладнання. Коректний вибір ОПН забезпечує їх правильну експлуатацію і, як наслідок, сприяє підвищенню надійності захисту електроустановок та електрообладнання від грозових та комутаційних перенапруг.

Таким чином, аналіз вимог до вибору та експлуатації ОПН, особливостей їх функціонування при захисті обладнання електричної мережі від перенапруг є дуже важливим завданням, що має практичний інтерес для енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням проблем у галузі захисту електричних мереж та обладнання від перенапруг приділяється багато уваги, оскільки вирішення цих питань нерозривно пов'язане з надійною експлуатацією коштовного обладнання електричних мереж, розвитком наукових підходів до вибору захисних апаратів [1; 2]. Розроблено значну кількість методик та нормативних документів щодо вибору та експлуатації ОПН [3-5]. Слід зазначити, що на сьогодні в Україні для електричних мереж 6-35 кВ виробництво і застосування ОПН регламентується документами [6], у той час як міжнародною електротехнічною комісією (МЕК) затверджено стандарт МЭК 60099-5 [7], а розробки виробників ОПН регламентують умови відповідно до [8-10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз досліджень і публікацій показав, що досі немає єдиного підходу до вирішення проблеми вибору типу захисних апаратів та методик погодження їх характеристик для забезпечення надійного захисту мереж та електричного обладнання від перенапруг.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є аналіз особливостей вибору обмежувачів перенапруги для надійного захисту обладнання від грозових і комутаційних перенапруг в електричних мережах 6-35 кВ.

Виклад основного матеріалу. Вибір ОПН здійснюється у випадках проектування нових об'єктів електроенергетики, реконструкції існуючих та в разі заміни вентильних розрядників на ОПН у діючих розподільчих установках.

Для коректного вибору ОПН необхідно вирішити такі головні завдання:

– ОПН має обмежувати комутаційні та грозові перенапруги до значень, за яких буде забезпечено надійну роботу ізоляції захищуваного електрообладнання протягом всього терміну служби ОПН;

– ОПН має надійно працювати без руйнування та зниження параметрів під час неперервного впливу тривалих робочих напруг, тимчасових підвищень напруг у робочих режимах, а також квазістаціонарних (усталених) перенапруг в умовах робочих і аварійних комутацій;

– ОПН повинен бути вибухобезпечний при протіканні струмів короткого замикання (КЗ) у результаті внутрішніх пошкоджень;

– ОПН повинен відповідати механічним та кліматичним умовам експлуатації.

Для вирішення цих завдань необхідно виконати [6]:

а) вибір найбільшої робочої напруги ОПН ($U_{нро}$);

б) уточнення вибору $U_{нро}$, якщо в мережі можливі тривалі підвищення напруги понад нормоване значення найбільшої робочої напруги мережі;

в) вибір номінального розрядного струму ($I_н$);

г) вибір питомої енергоємності ($W_{пит}$) і струму пропускної здатності ОПН (I_{2000});

д) вибір залишкових напруг ОПН для захисту від комутаційних та грозових перенапруг;

е) вибір ОПН за умовами забезпечення вибухобезпечності;

є) вибір ОПН залежно від умов експлуатації;

ж) вибір місця встановлення ОПН.

Електричні мережі України 6-35 кВ працюють з ізольованою нейтраллю або з компенсацією ємнісного струму на землю і не містять обертових машин, тому умови роботи ОПН у цих мережах відрізняються від умов роботи в мережах 110-750 кВ великими величинами і тривалостями комутаційних і квазістаціонарних перенапруг. Це впливає на методики вибору основних характеристик ОПН та експлуатацію захисних апаратів у таких мережах.

Надійність роботи захисних апаратів забезпечується коректним узгодженням характеристик встановлюваних ОПН з експлуатаційними впливами на ці апарати. Виходячи з цих умов, при виборі ОПН важливо звернути увагу на такі фактори.

Основною характеристикою ОПН є найбільша тривала допустима робоча напруга ОПН $U_{нро}$. Це найбільше діюче значення діючої напруги промислової частоти, яку можна підводити до виводів ОПН упродовж усього терміну його служби і яка не призводитиме до пошкодження або термічної нестійкості ОПН за нормованих дій [6].

Основою для вибору цієї напруги є найбільша робоча (лінійна) напруга в електричній мережі $U_{нрм}$.

У вказівках [4; 6; 10] вибір найбільшої тривало допустимої напруги ОПН 6-35 кВ здійснюється, виходячи з умов тривалості існування однофазного замикання на землю:

– у мережах, що допускають необмежено тривале існування стійкого металевого однофазного замикання на землю, згідно з ГОСТ 1516.3 $U_{нро} \geq U_{нрм}$;

– у мережах, де тривалість однофазного замикання на землю обмежується часом t, $U_{нро} \geq \frac{U_{нрм}}{K_t}$, де K_t – коефіцієнт, що визначається як відношення підвищення напруги в період часу *t*, яке допускається виробником, до найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН. Спосіб визначення K_t вказано в [4; 6; 10].

Додатково в [6] проводиться уточнення найбільшої тривало допустимої робочої напруги ОПН при однофазних дугових замиканнях на землю і за наявності в мережі квазістаціонарних перенапруг.

Крім того, для класів напруги 6-35 кВ згідно з [7] слід вибирати ОПН з напругою $U_{нро}$ не менше ніж на 5 % більше за найбільший рівень напруги мережі $U_{нрм}$.

Згідно з [7; 9] тривала допустима робоча напруга ОПН 6-35 кВ визначається за формулою:

$$U_{нро} \geq \frac{K_0 \cdot U_{нрм}}{K(t)}, \quad (1)$$

де K_0 – коефіцієнт, який залежно від особливостей електричної мережі та умов її роботи може набувати значень від 1 до 1,1; $K(t)$ – кратність, що характеризує здатність ОПН витримувати підвищення напруги частотою 50 Гц і тривалістю *t*. Точні значення величин K_0, $K(t)$ визначають за допустимим для зазначеного випадку часом однофазного замикання на землю відповідно до залежності «напруга-час» [6; 8].

Якщо рівень $U_{нро}$ в результаті вибору ОПН був прийнятий недостатнім, це призведе до втрати його теплової стійкості та аварійного пошкодження.

Номінальний розрядний струм $I_н$ – це максимальне (амплітудне) значення грозового імпульсу струму форми 8/20 мкс. Вибір $I_н$ проводять у разі встановлення ОПН для захисту від грозових і комутаційних перенапруг для нормальної ізоляції.

Згідно з рекомендаціями МЕК [7] максимальна амплітуда струму для діапазону номінальної лінійної напруги менше 142 кВ становить 5 кА; менше 360 кВ – 10 кА; більше 360 кВ – 20 кА.

Згідно з рекомендаціями [4; 6; 10] при встановленні ОПН 6-35 кВ для захисту від грозових перенапруг його номінальний розрядний струм приймають рівним 10 кА у випадках: грозової активності більше 50 грозових годин на рік; у мережах з повітряними лініями (ПЛ) на дерев'яних опорах; у схемах грозозахисту двигунів і генераторів, приєднаних до ПЛ; у районах з мірою забрудненості атмосфери IV (відповідно до ГОСТ 9920), а також при встановленні ОПН на відстані менше 1000 м від моря. В інших випадках приймається розрядний струм 5 кА.

Питома енергоємність ОПН (значення поглинутої енергії без руйнування при протіканні через нього струмів, обумовлених виникненням перенапруг, віднесене до тривало допустимої робочої напруги) $W_{пит.ОПН}$ визначається за умови:

$$\begin{aligned} W_{пит.ОПН} &> W_{пит.г}, \\ W_{пит.ОПН} &> W_{пит.к}, \end{aligned} \qquad (2)$$

де $W_{пит.г}$, $W_{пит.к}$ – питома енергія, що поглинається ОПН при грозових та комутаційних перенапругах відповідно.

Визначення енергоємності та струму пропускної здатності при виборі ОПН при грозових, комутаційних і дугових перенапругах з урахуванням досвіду експлуатації та чисельних розрахунків представлено у [2; 6].

Для розподільчих установок у мережах 6-35 кВ значення енергоємності ОПН у режимі однофазного дугового замикання на землю, при якому ОПН піддається найбільш важким енергетичним діям, повинне становити не менше ніж 2,1 кДж/кВ, а пропускна здатність ОПН повинна відповідати другому класу і вище (струм пропускної здатності має бути не нижче ніж 401 А).

Забезпечення надійної роботи ізоляції електрообладнання при комутаційних і грозових перенапругах здійснюється за умови дотримання узгодження залишкової напруги при комутаційних та грозових імпульсах з необхідними рівнями захисту ізоляції [6]:

$$\begin{aligned} U_{зал.к} &\le U_{зах.к}, \\ U_{зал.г} &\le U_{зах.г}, \end{aligned} \qquad (3)$$

де $U_{зал.к}$, $U_{зал.г}$ – залишкові напруги при комутаційних та грозових імпульсах відповідно, визначені з урахуванням вибраних раніше значень $U_{нро}$; $U_{зах.к}$, $U_{зах.г}$ – необхідні рівні захисту ізоляції від комутаційних і грозових перенапруг.

У рекомендаціях [4] вказано, що значення залишкової напруги на ОПН 6-35 кВ при розрахунковому струмі комутаційних перенапружень повинно бути не більше напруги, що витримується ізоляцією захищуваного електрообладнання. Напруга комутаційних імпульсів, що витримується ізоляцією, визначається за виразом [4; 6]:

$$U_{зах.к} = \sqrt{2} \cdot K_{імп} \cdot K_{зносу} \cdot U_{вип1хв}, \qquad (4)$$

де $K_{імп}$ – коефіцієнт імпульсу, який враховує зміцнення ізоляції при більш короткому порівняно з випробувальним імпульсі; $K_{зносу}$ – коефіцієнт зносу ізоляції в результаті багаторазовості впливу перенапруг і старіння ізоляції. Для ізоляції силових трансформаторів ці коефіцієнти дорівнюють $K_{імп} = 1{,}3$ і $K_{зносу} = 0{,}85$, а для ізоляції апаратів $K_{імп} = 1{,}1$ і $K_{зносу} = 0{,}9$ [6]; $U_{вип1хв}$ – однохвилинна випробувальна напруга внутрішньої та зовнішньої ізоляції промислової частоти 50 Гц в сухому стані згідно з ГОСТ 1516.3.

Для мереж 35 кВ додатково враховується координаційний захисний інтервал (співвідношення захисного рівня ізоляції і залишкової напруги) [6]:

$$U_{зал.к} \le \frac{U_{зах.к}}{K_{\Delta}}, \quad (5)$$

де K_{Δ} – коефіцієнт, якій враховує координаційний захисний інтервал ΔU (перепад напруги між ОПН та захищуваним об'єктом). При комутаційних перенапругах K_{Δ} = 1,15.

Під час розгляду комутаційних перенапруг необхідно також виконати перевірку вибраних ОПН за поглинанням (розсіюванням) енергії. Стандарт МЕК [7] рекомендує 2 види перевірки ОПН за поглинанням енергії комутаційних перенапруг. Перша з них відповідає перевірці ОПН за розрядом приєднаної лінії, заряд якої зберігся, наприклад, у результаті автоматичного повторного включення (АПВ). Енергія, яка поглинається ОПН, розраховується в цьому випадку за формулою:

$$W = 2U_{ps}\left(U_e - U_{ps}\right)\frac{T_w}{Z}, \quad (6)$$

де U_{ps} – залишкова напруга при комутаційному імпульсі; U_e – амплітуда перенапруги; Z – хвильовий опір лінії; T_w – час проходження хвилі перенапруги по лінії.

Згідно з [9] у формулу (6) додатково вводиться множник 3 (для урахування, наприклад, маловірогідного, але можливого триразового спрацьовування АПВ).

Для уніфікації процедури визначення енергії, що поглинається, від розряду лінії МЕК вводить поняття класу розряду лінії відповідно до номінальної лінійної напруги.

У разі використання в мережах батарей конденсаторів ємністю С стандарт МЕК [8] рекомендує проводити додаткову перевірку за енергоємністю W, яка визначається за формулою:

$$W = \frac{1}{2}C\left[\left(3U_0\right)^2 - \left(\sqrt{2}U_r\right)^2\right], \quad (7)$$

де U_0 – амплітуда найбільшої тривало допустимої робочої напруги фаза-земля; U_r – номінальна напруга ОПН.

У [4; 6] розрахунок енергоємності ОПН 6-35 кВ рекомендують проводити при дугових перенапругах однофазного замикання на землю. Вибір величини максимального струму пропускної спроможності ОПН визначається залежно від величини ємнісного струму замикання на землю і режиму роботи мережі.

Залишкова напруга при грозовому імпульсі визначається для струму з формою хвилі 8/20 мкс і нормованими амплітудами – 5, 10, 20 кА залежно від класу напруги обмежувача.

Перевірка залишкової напруги при виборі ОПН 6-35 кВ у [6; 8] проводиться, виходячи з умов відповідності, тобто вона має бути менше або дорівнювати залишковій напрузі вентильного розрядника. У [4; 6] вказано, що для ОПН при грозових перенапругах залишкова напруга повинна бути не вище залишкової напруги вентильного розрядника групи III або групи IV. Для мереж 35 кВ в [6] додатково враховується координаційний захисний інтервал, який при грозових перенапругах характеризується коефіцієнтом 1,3.

У міжнародному стандарті МЕК [7] пропонується оцінити енергію, яка поглинається ОПН при грозових перенапругах, за формулою:

$$W = \left[2U_f - NU_{pl}\left(1 + ln\frac{2U_f}{U_{pl}}\right)\right]\cdot\frac{U_{pl}\cdot T_l}{Z}, \quad (8)$$

де U_{pl} – залишкова напруга на ОПН при грозовому імпульсі; U_f – напруга перекриття лінійної ізоляції негативної полярності; Z – хвильовий опір лінії; N – кількість ліній, приєднаних до ОПН; T_l – тривалість струму при ударі блискавки, враховуючи перший і наступні удари.

Другим аспектом при виборі ОПН за грозовими перенапруженнями є визначення припустимої відстані встановлення ОПН від захищуваного електрообладнання.

У [6] при визначенні допустимої відстані від ОПН 6-35 кВ до електроустаткування мають бути розглянуті 4 випадки:

1) заміна вентильного розрядника на ОПН при реконструкції;

2) заміна ОПН на ОПН з іншою залишковою напругою при реконструкції;

3) проектування нових підстанцій за типовими проектами;

4) проектування нової підстанції, яка за схемою і розташуванням електроустаткування не відповідає типовим проектам.

У першому та третьому випадках необхідно керуватися рекомендаціями ПУЕ [11].

У другому випадку допустима відстань має бути уточнена з використанням виразу:

$$\Delta L \le \frac{0{,}7V\left(U_{зал1} - U_{зал2}\right)}{2a}, \qquad (9)$$

де ΔL – різниця між відстанями до захищуваного обладнання від ОПН1, який замінюється, і ОПН2, який встановлюється; $U_{зал1}$ – залишкова напруга на ОПН1; $U_{зал2}$ – залишкова напруга на ОПН2; V – швидкість поширення електромагнітної хвилі; a – середня крутизна грозових хвиль.

У четвертому випадку необхідно виконувати спеціальні розрахунки блискавкозахисту підстанції, які дозволять визначити місця установки ОПН.

При виборі ОПН за умовами вибухобезпечності нормується величина струму спрацьовування противибухового пристрою, при якій не відбувається вибухового руйнування покришки ОПН при його внутрішньому пошкодженні.

У [6; 7; 9] сказано, що вибір ОПН за умовами вибухобезпечності повинен забезпечувати гарантію відсутності вибухового руйнування ОПН при протіканні в середині його корпусу струмів КЗ.

Струм спрацьовування пристрою скидання тиску ОПН 6-35 кВ, згідно з [4; 6], вибирають не менше ніж на 10 % більшим значення двофазного або трифазного (більшого з них) струму короткого замикання в місці установки ОПН.

Згідно з [6; 8] ОПН 6-35 кВ повинні витримувати механічні навантаження при ожеледі з товщиною стінки льоду до 20 мм і вітрі зі швидкістю 15 м/с, а за відсутності ожеледі – зі швидкістю 40 м/с і при тяжінні проводів у горизонтальному напрямі згідно з ГОСТ 16357 [12].

Висновки і пропозиції. Затверджені в Україні методики вибору і застосування ОПН 6-35 кВ потребують подальшого розвитку в напрямку узгодженості з вимогами виробників та застосування статистичних методів розрахунку показників роботи ОПН, а також показників надійності захисту обладнання.

За таких умов удосконаленими методиками можливо буде користуватись при обґрунтуванні вибору ОПН без додаткових погоджень, що значно спростить проектувальну роботу.

Список використаних джерел

1. *Защита* сетей 6-35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов, Г. А. Едокунин, В. С. Поляков, Г. В. Подпоркин, А. И. Таджибаев. – СПб. : Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.

2. *Дмитриев М. В.* Применение ОПН в электрических сетях 6-750 кВ / М. В. Дмитриев. – СПб. : Нива, 2007. – 57 с.

3. *Иманов Г. М.* Методика выбора нелинейных ограничителей, необходимых для защиты изоляции низкого, среднего, высокого и сверхвысокого напряжения трехфазного переменного тока / Г. М. Иманов, Ф. Х. Халилов, А. И. Таджибаев. – СПб. : Изд-во Петербургского энергетического института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минэнерго РФ, 2004. – 32 с.

4. *Методические* указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ : утверждены Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 27.04.2001. – М. : С.ПРИНТ, 2001. – 73 с.

5. *Режим* доступу : http://1kv.com.ua/vibor-uc-opn.html.

6. *СОУ-Н* МЕВ 40.1-21677681:2012. Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках. – К. : Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2012. – 50 с.

7. *Стандарт МЭК 60099-5:2000.* Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению.

8. *Методичні* вказівки з вибору обмежувачів перенапруг нелінійних виробництва підприємства «Таврида Електрик Україна» для електричних мереж 6-35 кВ : затверджено наказом Державного департаменту електроенергетики Мінпаливенерго України від 02.08.2001 № 4. – Севастополь : НВЦ «ЄКОСІ-Гідрофізика», 2002. – 40 с.

9. *Фолькер Хинрихсен.* Металлооксидные ограничители. Основы / Фолькер Хинрихсен ; пер. с немецкого под ред. В. П. Вертикова. – СПб. : ООО «Сименс», Департамент PTD, 2000. – 114 с.

10. *Выбор,* испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. – К. : Представительство АББ Украина, 1995. – 52 с.

11. *Правила* устройства электроустановок. – 3-е изд., перераб. и доп. – Х. : Форт, 2010. – 736 с.

12. *ГОСТ 16357–83.* Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия.

УДК 681.516.77:621.314.2

А.А. Жиленков, ст. преподаватель
С.Г. Чёрный, канд. техн. наук
Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Украина

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА С МОДУЛЬНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

А.О. Жиленков, ст. викладач
С.Г. Чорний, канд. техн. наук
Керченський державний морський технологічний університет, м. Керч, Україна

АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА З МОДУЛЬНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ

A.A. Zhylenkov, senior lecturer
S.H. Chiornyi, Candidate of Technical Sciences
Kerch State Marine Technical University, Kerch

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF ACTIVE FILTER WITH MODULAR TOPOLOGY

В статье представлены результаты разработки адаптивного фильтра сигналов систем управления полупроводниковых преобразователей и активных фильтрокомпенсирующих устройств, работающих в составе электроэнергетической системы ограниченной мощности.

Ключевые слова: *автономная электростанция, мощная нелинейная нагрузка, адаптивная фильтрация, нейронная сеть, сигнал.*

У статті надані результати розроблення адаптивного фільтра сигналів систем управління напівпровідникових перетворювачів та активних фільтрокомпенсуючих пристроїв, які працюють у складі електроенергетичної системи обмеженої потужності.

Ключові слова: *автономна електростанція, потужне нелінійне навантаження, адаптивна фільтрація, нейронна мережа, сигнал.*

In the article the results of development of adaptive filter for signals of control system in semiconductor converters and power filter-compensating devices, workings in electroenergy system with limited power are presented.

Key words: *autonomouspower-station, powerful nonlinear load, adaptive filtration, neural network, signal.*

Постановка проблемы. Современные судна содержат сложные технические комплексы, в которых широко используются различные электрифицированные и автоматизированные технические средства, к которым относятся: снабжение потребителей необходимым видом энергии, обеспечение движения и маневрирования судна, предотвращение аварий и борьба с их последствиями, создание условий жизнеобеспечения и нормальных условий эксплуатации судового оборудования.

Наиболее важное техническое средство судна – судовая электроэнергетическая система (СЭЭС). Она выполняет выработку, распределение, передачу и потребление электроэнергии.

СЭЭС имеют свои особенности и существенно отличаются от наземных электроэнергетических систем (ЭЭС). Основными характерными чертами судовых и корабельных ЭЭС являются [2]:

– соизмеримость мощностей генераторов и потребителей электроэнергии;
– большое количество потребителей, различающихся по роду тока, напряжения, мощности и функциям;
– нелинейность многих видов нагрузки;
– высокие требования к качеству электроэнергии, питающей системы автоматики, радиолокации, связи и др.;
– частые и большие динамические изменения нагрузки;
– высокие требования по надёжности и др.

На судах, где используются системы электродвижения на основе гребных электрических установок (ГЭУ) или винто-рулевых комплексов (ВРК), которые для наиболее эффективного использования системы получают питание от единой СЭЭС, обеспечивающей энергией все общесудовые потребители, питание таких пропульсивных установок осуществляется через полупроводниковые преобразователи, негативно воздействующие на питающую сеть переменного тока путем генерации в неё высших гармонических составляющих токов и напряжений. Нежелательное воздействие на питающую сеть переменного тока заключается в генерации нелинейными нагрузками гармонических составляющих тока и напряжения, отличающихся от основной гармоники. В результате этого возникают нелинейные искажения кривой напряжения сети или, другими словами, искаженные несинусоидальные режимы. Гармонические составляющие тока и напряжения повышают вероятность возникновения резонансных явлений в СЭЭС, нарушают работу микропроцессорной техники, устройств релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, вызывают ускоренное старение изоляции основного электрооборудования, снижая, тем самым, надёжность электроснабжения потребителей автономного объекта.

Специфическими особенностями работы нелинейных нагрузок в ЭЭС ограниченной мощности является то, что нелинейные нагрузки, генерирующие гармонические составляющие тока, являются основным возмущающим фактором в таких системах. Кроме того, в СЭЭС большое значение имеет решение вопросов совместной работы резкопеременных мощных нагрузок с чувствительными к искажению напряжения, как правило, маломощными специальными электроприемниками.

Если представить генераторы СЭЭС неидеальным источником Vs с внутренним импедансом Zs, а нелинейную нагрузку импедансом Z_L и источником тока гармоник I, то мы получим описание, характеризующее одно из свойств нелинейной нагрузки, а именно то, что форма тока, протекающего через нелинейный элемент, не повторяет форму приложенного к нему синусоидального напряжения, т. е. нелинейная нагрузка генерирует гармонические токи, спектр которых отличен от спектра приложенного к нагрузке напряжения.

Если импеданс источника так мал, что им можно пренебречь, или значительно меньше импеданса нагрузки, то есть $|Z_L| \gg |Z_S|$, то форма кривой напряжения, приложенная к нагрузке, не зависит от протекающего тока. Таким образом, циркулирование токов гармоник не приводит к сколько-нибудь заметному отклонению формы кривой напряжения на шинах, питающих нагрузку, от синусоидальной – этот случай соответствует работе нагрузке от источника бесконечной мощности.

Если же нагрузка питается неидеальным источником напряжения, то есть $|Z_S| \geq |Z_L|$, токи гармоник, протекающие по нелинейной нагрузке, создают в этом случае падение на-

пряжения гармоник на внутреннем импедансе источника, поэтому кривая напряжения, приложенного к нагрузке, будет искажена (даже если источник напряжения чисто синусоидален), а на специфических частотах, для которых $|Z_S+Z_L|\approx 0$, происходит параллельный резонанс, приводящий к значительному увеличению тока этих гармоник. Это, в свою очередь, приводит к значительному увеличению падения напряжения гармоник на внутреннем импедансе источника и, как следствие, значительному искажению кривой напряжения на шинах, питающих нагрузку. Значительное искажение кривой напряжения на питающих шинах требует проведения мероприятий, которые позволили бы осуществлять параллельную работу мощных нелинейных нагрузок с маломощными электроприемниками, чувствительными к искажению напряжения. Такими электроприемниками, например, можно считать системы управления самих мощных нелинейных нагрузок, т. е. системы управления преобразователей ГЭУ. Так, для ГЭУ постоянного тока, питающегося через тиристорный преобразователь (ТП) от СЭЭС переменного тока, характерна проблема влияния вносимых в сетевые токи и напряжения искажений от ТП, на систему управления самого ТП, до полного срыва работы последнего [1]. Это связано с тем, что подобные системы используют в качестве опорных искаженные сигналы сетевых токов и напряжений.

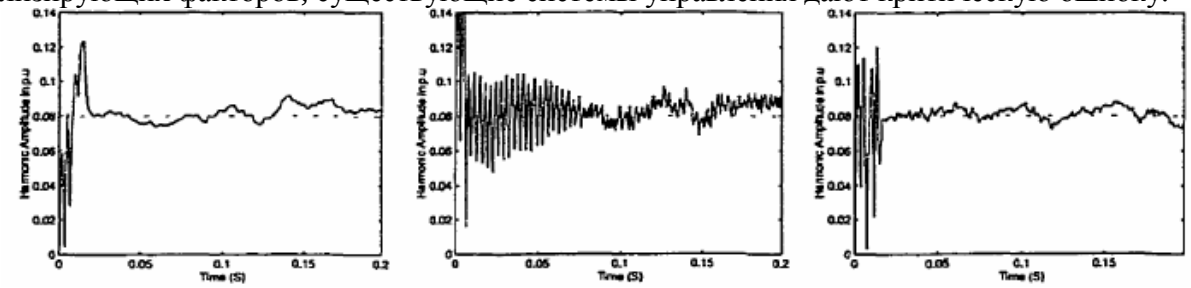
Анализ последних достижений и публикаций. Основные вопросы, касающиеся этой проблемы, сводятся к следующим: оценке электромагнитной совместимости источников высших гармоник и других нагрузок, т. е. влияния высших гармоник на электроустановки и возникающего при этом экономического ущерба; количественной оценке высших гармоник тока, генерируемых различными нелинейными нагрузками, и прогнозированию значений высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения; снижению уровней высших гармоник. В последние несколько десятилетий была создана база для практической реализации методов активной фильтрации. Появление полностью управляемых быстродействующих полупроводниковых приборов – запираемых тиристоров, мощных полевых транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором, с высокими значениями коммутируемых токов и напряжения, позволило создать новое направление – активную фильтрацию.

Активный (силовой) фильтр (АФ) представляет собой 4-квадрантный преобразователь напряжения, на полностью управляемых ключевых элементах, с емкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока, формирующий методами импульсной модуляции усредненное значение тока (напряжения), равное разности нелинейного тока (или напряжения) и синусоидального тока (напряжения) его основной гармоники. Активный фильтр обеспечивает компенсацию высших гармоник тока или напряжения сети путём генерирования высших гармоник тока или напряжения в сеть, в противофазе с высшими гармониками тока или напряжения сети.

Силовая часть АФ, как правило, представлена инвертором, получающим сигналы управления от системы управления АФ. Наибольшая часть исследований АФ за последние тридцать лет относилась к их системам управления. Целью было получение качественных и быстрых алгоритмов выделения опорных токов и напряжений.

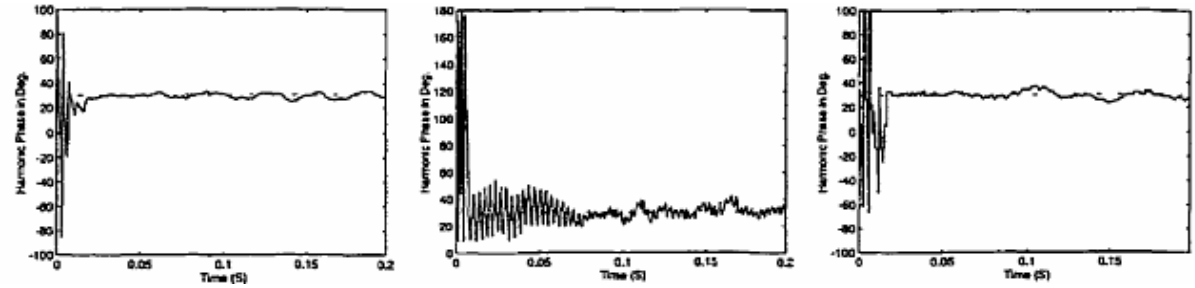
Помимо быстрого преобразования Фурье, в настоящее время активно применяются методы на основе использования фильтра Калмана, а также искусственных нейронных сетей. Однако каждый из этих методов имеет в той или иной степени один недостаток – время адаптации к изменениям в анализируемом сигнале. В наилучшем случае, при неизменной частоте тока питающей сети и резком изменении его гармонического состава, системе управления необходимо время не менее одного периода напряжения сети. Изменение же частоты питающей сети, низкочастотные колебания (характерные для дисбаланса в трехфазной сети без нулевого провода), мощные помехи приводят, как правило, к катастрофическим последствиям. Это связано с тем, что при работе в частотной области, изменение

частоты основной гармоники на 0,4 Гц приводит к ошибке в определении амплитуды 5-й гармоники равной 10 %. Чтобы избавиться от этой ошибки, необходимо определять частоту основной гармоники. Для этого используют метод, отслеживающий частоту сигнала по его прохождению через ноль. Но даже в четырехпроводной сети этот алгоритм требует времени не менее 3 периодов основной гармоники, что удобно представить (рис. 1 и рис. 2). Учитывая отсутствие в СЭЭС нулевого провода – и, как следствие, неизвестность фазных напряжений сети, – искаженность линейных напряжений, а также прочих дестабилизирующих факторов, существующие системы управления дают критическую ошибку.



а *б* *в*

Рис. 1. Определение амплитуды 5-й гармоники:
а – нейронной сетью, б – фильтром Калмана, в – быстрым преобразованием Фурье



а *б* *в*

Рис. 2. Определение фазы 5-й гармоники:
а – нейронной сетью, б – фильтром Калмана, в – быстрым преобразованием Фурье

Возможность быстрого определения параметров основной гармоники – важнейшая задача, которую необходимо решить при реализации системы управления АФ. В тоже время, АФ, как правило, включаются в состав активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ), где всю мощность искажений (все гармоники, кроме первой) компенсирует один инвертор. В высоковольтных СЭЭС такие системы работают на пределе возможностей, что связано с ограничениями по частоте коммутации и номинальной мощности используемых полупроводниковых ключей. Кроме того, поломка одного узла такой системы приводит к выходу из строя всего АФКУ.

Существует ряд работ, предлагающих использование многоконверторных или модульных топологий АФ, лишенных обозначенных недостатков со стороны силовой части, но имеющими те же проблемы в реализации их систем управления. В модульной реализации фильтрация распределяется между несколькими модулями активных фильтров, имеющих одинаковую структуру и схемотехнику. Мощность и частотная характеристика каждого модуля определяется конкретными задачами фильтрации, возлагаемыми на этот конкретный модуль.

Цель статьи. Предлагаемый в настоящей статье подход основывается на использовании адаптивных фильтров и теории наблюдающих устройств, а также реализацию в системе управления аппроксимации фильтруемого сигнала суммой синусоидальных составляющих. Он позволяет построить АФ с низкими потерями на переключение, высокой надежностью, гибкостью, быстрым откликом, самонастройкой и высокой точностью.

Изложение основного материала. На рис. 3 приведена структурная схема предлагаемого АФ. Блок выделения основной гармоники представляет собой наблюдающее устройство, содержащее эталонную модель источника энергии СЭЭС, т. е. дизель-генератора (ДГ). По доступным для измерения искаженным линейным напряжениям и фазным токам сети этот блок восстанавливает амплитуду и частоту ЭДС синхронного генератора (СГ) ДГ. Известно, что напряжение на клеммах генератора отстает от ЭДС на угол, зависящий от нагрузки СГ.

С другой стороны, очевиден подход аппроксимации фильтруемого сигнала суммой гармонических составляющих ряда Фурье (1):

$$Y = \sum_{n=1,\dots,N} \left[A_{n1} \cos(n\omega t) + A_{n2} \sin(n\omega t) \right], \qquad (1)$$

где ω – частота основной гармоники сигнала;

n – номер гармоники;

A – амплитуды составляющих.

Рис. 3. Структурная схема предлагаемого АФ

То есть непрерывный сигнал есть суммой синусоидальных и косинусоидальных составляющих с соответствующими амплитудами и частотами. Такой подход реализуется при разложении в ряд Фурье с помощью искусственных нейронных сетей (рис. 4). Однако, т. к. фазные напряжения имеют плавающий сдвиг фазы относительно восстановленных ЭДС, то в блоке выделения составляющих сигнала искажения сигнал аппроксимируется суммой синусоидальных составляющих с изменяемыми амплитудами и фазами. В блоке формирователя сигналов компенсации вычисляются и распределяются сигналы управления, создающие на выходах силовой части фильтра токи и напряжения, равные и обратные по знаку составляющим сигнала искажения.

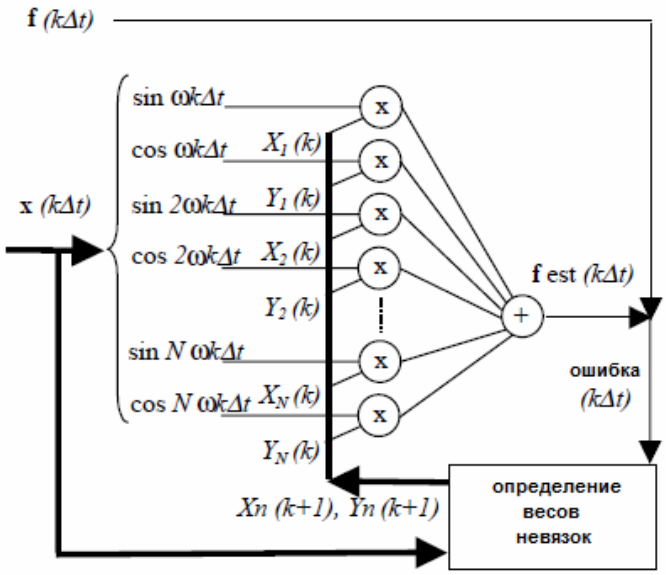


Рис. 4. Схема разложения в гармонический ряд с помощью искусственной нейронной сети

Гармонические составляющие более высоких порядков, как правило, имеют меньшую амплитуду. В связи с этим в предложенном фильтре силовые преобразователи, отвечающие за подавление гармонических составляющих низкого порядка, работают с более высокими напряжениями, но с более низкочастотными коммутациями, в то время как преобразователи, отвечающие за подавление более высоких гармоник, работают с меньшими рабочими напряжениями, но с повышенной частотой переключений. В результате, общие коммутационные потери значительно снижаются в связи с избирательным действием на определенные гармоники и сбалансированным показателем «мощность-частота» каждого конвертора. Результат математического моделирования работы предложенного АФ приведен на рис. 5.

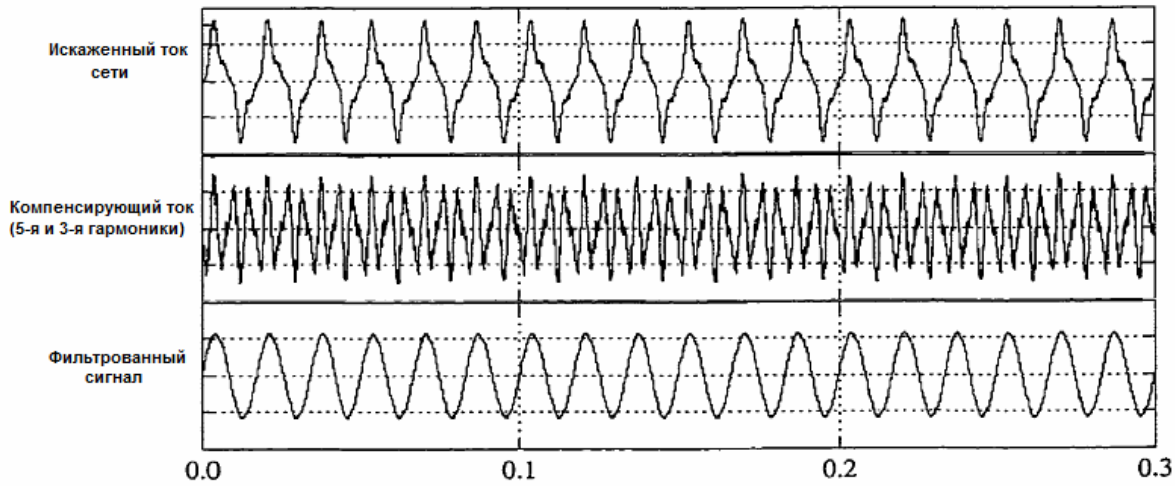


Рис. 5. Результат моделирования работы компенсирующих модулей АФ

Заключение. Представлен новый метод построения АФ на основе наблюдающего устройства, адаптивного аппроксиматора и модульной топологии фильтра, позволяющей избирательно подавлять высшие гармоники мощности искажений. Фильтр лишен недостатков известных реализаций на нейронных сетях в виде неконтролируемого ухода основной частоты при скачке фазы опорного сигнала, медленной адаптации к резким изменениям характера искажений и т. п. АФ может работать в сетях с изолированной нейтралью и дисбалансами токов и напряжений при неизвестных фазных напряжениях сети.

Список использованных источников

1. *Жиленков А. А.* Влияния мощных тиристорных выпрямителей на питающую их автономную электростанцию / А. А. Жиленков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 14-19.

2. *Качество* электрической энергии на судах : справочник / В. В. Шейнихович, О. Н. Климанов, Ю. И. Пайкин, Ю. Я. Зубарев. – Л. : Судостроение, 1988. – 160 с.

3. *Плахтина О. Г.* Частотно-управляемые асинхронные и синхронные электроприводы / О. Г. Плахтина, С. С. Мазепа, А. С. Куцик. – Львов : Издательство Национального университета «Львовская политехника», 2002. – 227 с.

4. *Чёрный С. Г.* Разработка системы автоматизированного проектирования для сложных структур / С. Г. Чёрный, Н. А. Козуб, Н. А. Субботина // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали XIV Міжнар. науково-технічної конф. SAIT 2012 (м. Київ, 14 квітня 2012 р.). – К. : ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2012. – С. 425-426.

РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ І ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 624-057(477.51)

В.А. Іванишин, д-р геол. наук
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна
С.М. Шпилька, провідний інженер-геолог
ДП «Водземпроект» ПАТ «Чернігівський проектно вишукувальний інститут «Чернігівводпроект», м. Чернігів, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ ВИШУКУВАНЬ ПІД БУДІВНИЦТВО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ З ПІДЗЕМНИМ ПАРКІНГОМ: ПОЛЬОВІ І ЛАБОРАТОРНІ ВИШУКУВАННЯ

В.А. Иванишин, д-р геол. наук
Черниговский государственный институт экономики и управления, г. Чернигов, Украина
С.Н. Шпилька, ведущий инженер-геолог
ДП «Водземпроект» ПАТ «Черниговский проектно изискательный институт «Черниговводпроект», г. Чернигов, Украина

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПОД СТРОИТЕЛЬСТВО ЖИЛОГО ДОМА С ПОДЗЕМНЫМ ПАРКИНГОМ: ПОЛЕВЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

V.A. Ivanyshyn, Doctor of Geological Sciences
Chernihiv State Institute of Economics and Management, Chernihiv, Ukraine
S.M. Shpylka, advanced geological engineer
"Vodzemproekt" PJSC "Chernihivkyy Design and Exploration Institute «Chernihivvodproekt», Chernihiv, Ukraine

RESULTS OF GEOLOGICAL AND ENGINEERING SURVEYS FOR APARTMENT AND UNDERGROUND PARKING BUILDING: FIELD AND LABORATORY SURVEYS.

Досліджена ділянка рівнинна, знаходиться на другій надзаплавній терасі річки Стрижень. До складу інженерно-геологічних досліджень входили польові і лабораторні роботи. За результатами вивчення матеріалів розвідувального буріння, шурфування, лабораторних досліджень у геологічному розрізі до глибини 18 м виділено сучасні техногенні та верхньочетвертинні відклади, а в них п'ять інженерно-геологічних елементів (ІГЕ). За сукупністю ознак інженерно-геологічні умови відносяться до другої категорії складності. При зміщенні габаритів будівлі в плані або суттєвих змін технічних характеристик її інженерно-геологічні умови ділянки повинні уточнюватися.

***Ключові слова**: інженерно-геологічні вишукування, відклади, інженерно-геологічні елементи, річка, ділянка.*

Исследованный участок ровный, находится на второй надпойменной террасе речки Стрижень. В состав инженерно-геологических исследований входили полевые и лабораторные работы. В результате изучения материалов разведочного бурения, шурфования, лабораторных исследований в геологическом разрезе до глубины 18 м выделено современные техногенные и верхнечетвертичные отложения, а в них пять инженерно-геологических элементов (ИГЭ). По совокупности признаков инженерно-геологические условия относятся ко второй категории сложности. При смещении габаритов строения в плане или существенных изменениях технических характеристик его инженерно-геологические условия участка должны уточняться.

***Ключевые слова**: инженерно-геологические исследования, отложения, инженерно-геологические элементы, речка, участок.*

The investigated plot of land is flat and it is situated on the second terrace above the flood-plain of Strizhen River. Field works and laboratory researches were held as a part of geotechnical investigations. The current Technogenetics and Upper Quaternary deposits with five geotechnical elements were distinguished in the geological section to a depth of 18 m as a consequence of materials study concerning drilling, pit sampling and laboratory researches. Geotechnical conditions considering their main characteristics refer to the second category of difficulty. Geotechnical conditions of the plot of land should be specified in the case of displacement of building dimensions in the plan or major modification of its technical specifications.

***Key words**: geotechnical, researches, deposits, geotechnical elements, river, plot.*

Постановка проблеми. Результати інженерно-геологічних вишукувань (досліджень), які будуть викладені у статті, є локальним, частковим вирішенням великої проблеми, яка стосується укладання інженерно-геологічної карти території м. Чернігів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На цій ділянці інженерно-геологічні вишукування не проводилися, а тому публікації відсутні.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Частина території м. Чернігів не охоплена інженерно-геологічними вишукуваннями.

Мета статті. Метою статті є поширення інформації про інженерно-геологічні особливості території м. Чернігів, формування рекомендацій для обґрунтування проектних рішень у будівництві.

Виклад основного матеріалу. Згідно з замовленням товариства з обмеженою відповідальністю (ТОВ) «Основа-буд-7» інженерно-геологічні вишукування на ділянці під будівництво багатоповерхового житлового будинку з підземним паркінгом між вул. Київська (буд. 7) та Проспект Миру (буд. 47) в м. Чернігів (рис. 1, 2) виконувалися відділом геології дочірнього підприємства (ДП) «Водземпроект» публічного акціонерного товариства (ПАТ) «Чернігівський проектно-вишукувальний інститут ”Чернігівводпроект“».

У процесі виконання робіт використані архівні матеріали про результати інженерно-геологічних вишукувань на прилеглих площах, де побудовані одно- та багатоповерхові будинки і при обстеженні яких у надфундаментних конструкціях деформацій не виявлено.

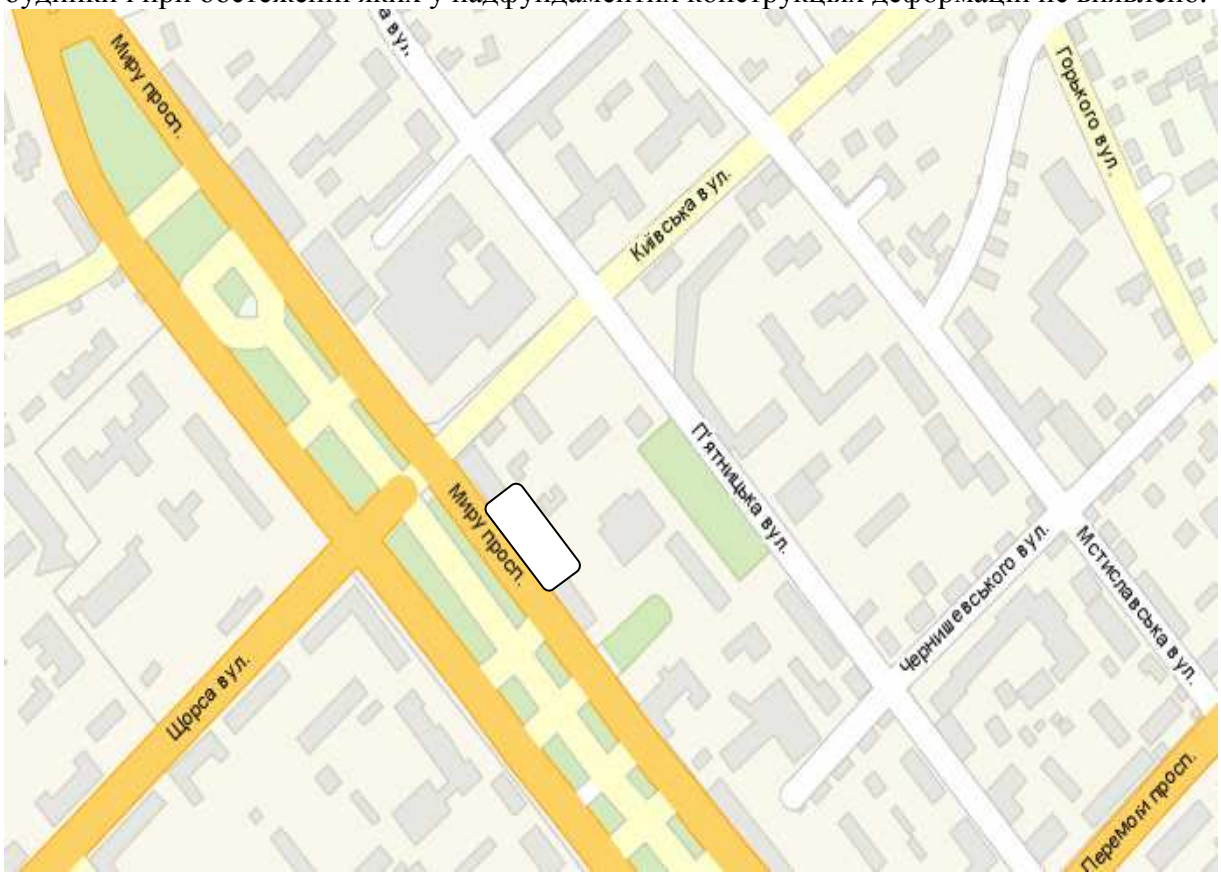


Рис. 1. Оглядова карта

ділянка досліджень

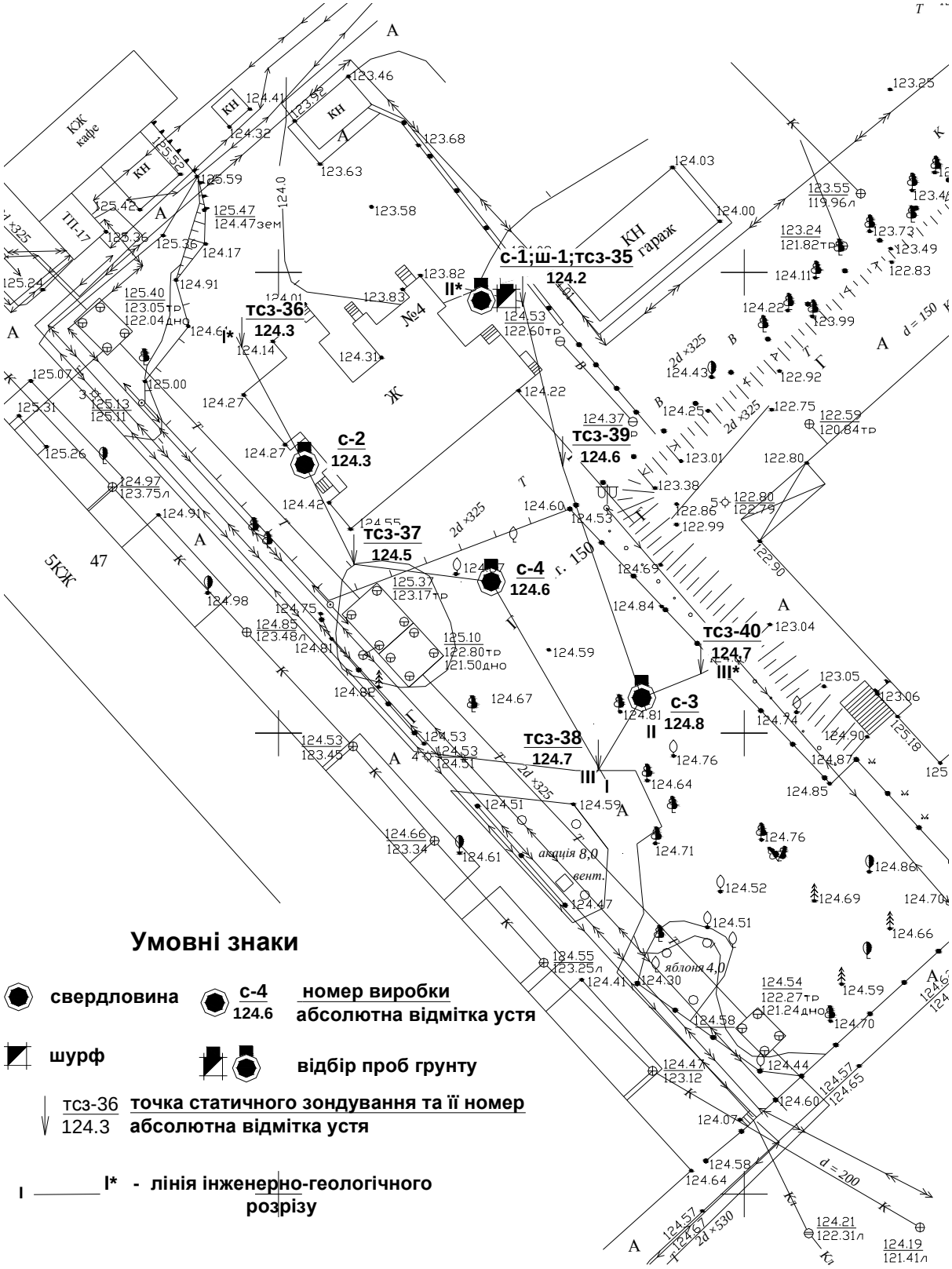


Рис. 2. Схема розташування виробок

До складу інженерно-геологічних вишукувань на ділянці майбутнього будівництва входили польові і лабораторні роботи, види, обсяги і методи яких містяться в табл. 1.

Таблиця 1

Види, обсяги і методи виконаних робіт

№ п/п	Назва робіт	Методи виконання робіт	Одиниця виміру	Кількість
А. Польові роботи				
1.	Буріння свердловин	Механічний спосіб d = 180 мм	шт м	4 66,0
2.	Проходка шурфів	Механічний спосіб d = 800 мм	шт м	1 9,2
3.	Відбір проб ґрунту порушеної структури	ДСТУ Б В.2.1.-8-2001	проб	37
4.	Відбір проб ґрунту непорушеної структури	ДСТУ Б В.2.1.-8-2001	проб	54
5.	Статичне зондування	ДСТУ Б В.2.1-5-96	точка	6
Б. Лабораторні роботи				
1.	Консистенція	ДСТУ Б В.2.1-17:2009	визн.	7
2.	Повний комплекс фізичних властивостей	ДСТУ Б В.2.1-17:2009	визн.	54
3.	Гранулометричний склад	ДСТУ Б В.2.1-19:2009	визн.	30

Згідно з геоморфологічним районуванням України досліджувана ділянка знаходиться на другій надзаплавній терасі р. Стрижень. Рельєф ділянки – рівнинний. Абсолютні відмітки поверхні землі становлять +124,2 – +124,85 м. Клімат району – помірно-континентальний. Середньодобова температура повітря нижче 0ºС триває близько 126 діб. Середньорічна температура повітря становить +6,5ºС. Абсолютна мінімальна температура повітря – -34 ºС, абсолютна максимальна температура – +39 ºС. Глибина сезонного промерзання ґрунтів досягає 1,0 м, максимальна – 1,4 м, середня – 0,8 м. Середньорічна кількість опадів – 620 мм/рік.

За державними будівельними нормами (ДБН В.1.2:2006, додаток Е) допускається нормативне вітрове навантаження – 410 Па, снігове навантаження – 1720 Па, товщина стінки ожеледиці – 16 мм, нормативне вітрове навантаження при ожеледиці – 160 Па.

Геологічний розріз ділянки на глибину до 18,0 м складений сучасними супіщано-піщаними техногенними відкладами (tIV) товщиною до 2,0 м та верхньочетвертинними алювіальними відкладами (aIII) (піски пилуваті та дрібнозернисті, супіски тверді) загальною пройденою товщиною 17,0 м.

Пробурені свердловини не досягли сучасних алювіальних відкладів.

Інженерно-геологічна графічна модель будови ділянки відображена на розрізах I-I*; II-II*; III-III* (рис. 3, 4, 5).

За результатами вивчення матеріалів розвідувального буріння, шурфування, лабораторних досліджень та статичного зондування, згідно з ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96), в геологічному розрізі згори донизу виділено 5 інженерно-геологічних елементів (ІГЕ-1, ІГЕ-2, ІГЕ-3, ІГЕ-4, ІГЕ-5).

ІГЕ-1 – складений насипним супіщано-піщаним сірим твердим з будівельним сміттям (до 10 %) ґрунтом; ІГЕ-2 – піском пилуватим сірувато-жовтим середньої щільності з малим та середнім водонасиченням з лінзами супіску легкого; ІГЕ-3 – піском пилуватим сірувато-жовтим, щільним, малим та середнім водонасиченням з лінзами супіску легкого; ІГЕ-4 – супіском сірувато-жовтим твердим; ІГЕ-5 – піском дрібнозернистим жовто-сірим, щільним від малого водонасичення до насиченого.

Нормативні і розрахункові характеристики фізико-механічних показників ґрунтів наведені у табл. 2.

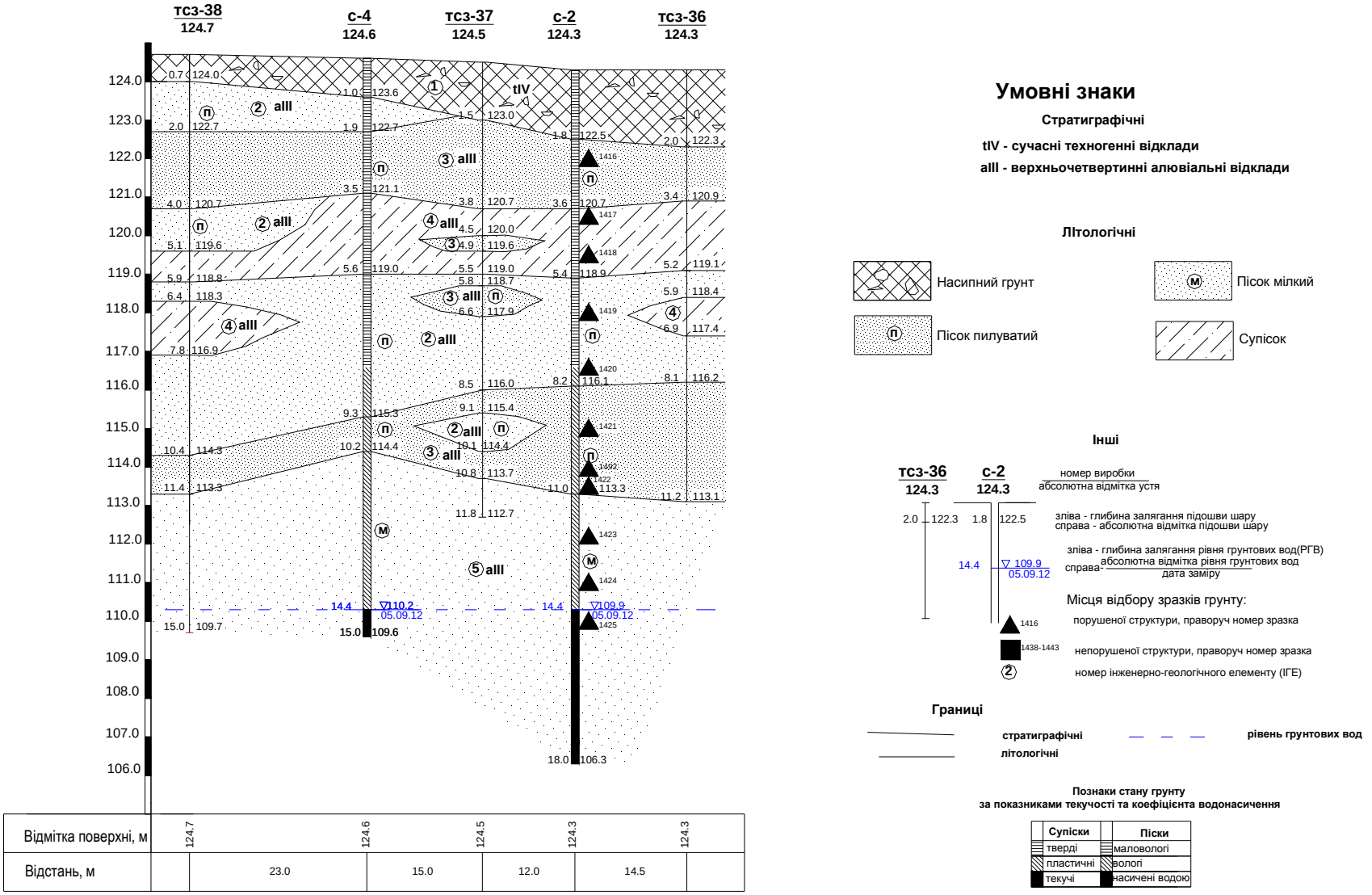


*Рис. 3. Інженерно-геологічний розріз І-І**

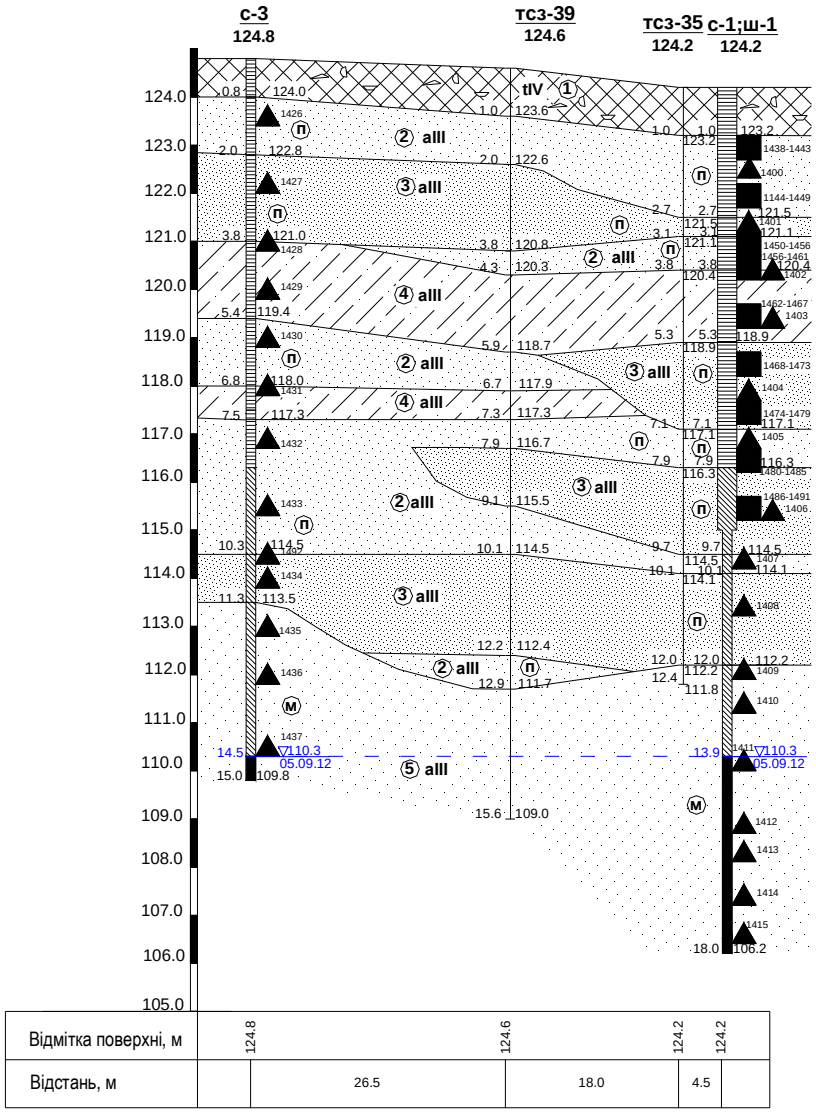


*Рис. 4. Інженерно-геологічний розріз II-II**

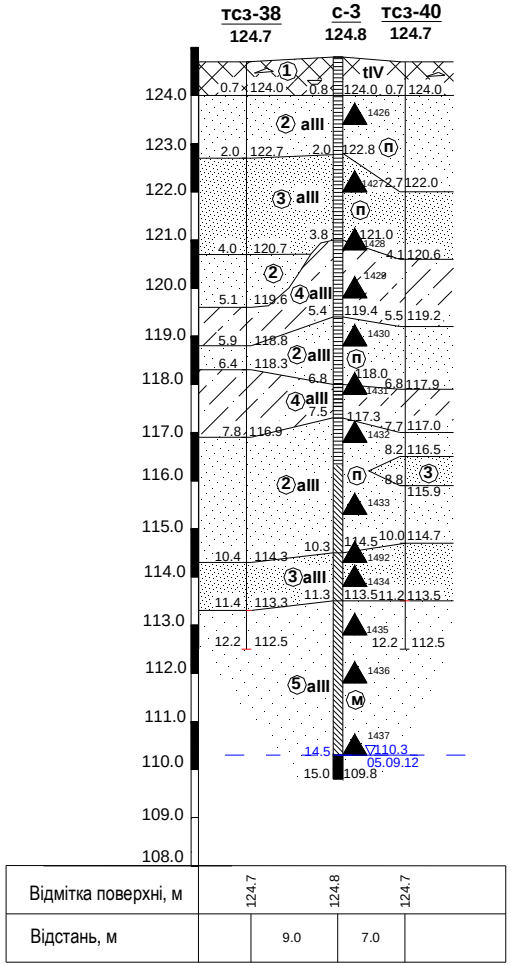


*Рис. 5. Інженерно-геологічний розріз III-III**

Таблиця 2

Зведена інженерно-геологічна колонка

Індекс генезіса і вік ґрунту	Літологічний розріз і номер інженер геологічного елементу	**Назва ґрунту** згідно ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95)	Природна вологість	Нормативні значення ґрунтів																		Розрахункові значення ґрунтів					№№ пунктів ДБН Д.2.2-1-99 в залежності від трудності розробки
				Границя текучості	Границя розкочування	Число пластичності	Показник текучості	Щільність часток ґрунту	Щільність ґрунту	Щільність сухого ґрунту	Пористість	Коефіцієнт пористості	Ступінь вологості	Вологоємкість повна	Кут внутрішнього тертя	Питоме зчеплення	Модуль деформації	Умовний розрахунковий опір	Питомий опір ґрунту під конусом зонду,Мпа	Питомий опір ґрунту під конусом зонду,Мпа	Щільність	Кут внутрішнього тертя		Питоме зчеплення			
			W	W_L	Wp	I_p	I_L	ρ_s	ρ	ρ_d	n	e	S_r	w_{sat}	$\varphi^н$	$c^н$	E	R_0	q	f	ρ''	φ''	φ'	c''	c'	
			д. од.					г/см^3			%	д. од.			Град	кПа	МПа	кПа	МПа	кПа	г/см^3	град.		кПа		
tlV	1	Насипний грунт супіщано-піщаного складу сірий твердий з включенням будівельного сміття до 10%																	2,90	10,50						26А
aIII	2 П	Пісок пилуватий сірувато-жовтий середньої щільності малого та середнього ступеню водонасичення з лінзами супіску легкого	0,06					2,65	1,69	1,60	39,7	0,660	0,23	0,25	30	4	18	150	8,45	123,70	1,69± 0,01	30	26	4	3	29А
	3 П	Пісок пилуватий сірувато-жовтий щільний малого та середнього ступеню водонасичення з лінзами супіску легкого	0,11					2,66	1,86	1,68	36,9	0,585	0,49	0,22	32	5	24	200	15,81	201,05	1,86± 0,02	32	28	5	3	29А
	4	Супісок сірувато-жовтиий твердий	0,16	0,22	0,18	0,04	-0,69	2,67	1,84	1,58	40,7	0,688	0,64	0,26	25	14	13	250	6,82	105,75	1,84± 0,01	25	23	14	9	36А
	5 М	Пісок мілкий жовто-сірий щільний від малого ступеню водонасичення до насиченого водою						2,66*	1,91*	1,70*	_	0,559*	0,48*	0,21*	37	4	40	300	26,56	315,84	1,91± 0,02	37	32	4	3	29А

*Примітка: * – дані запозичені з архівних матеріалів.*

Характеристики міцності і деформації наведені згідно з ДБН В.2.1-10-2009 табл.1, 2, 3 з урахуванням результатів статичного зондування ґрунтів.

Під час вишукувань (вересень 2012 р.) рівень ґрунтових вод зафіксовано на глибині 13,9-14,5 м, з абсолютними відмітками 109,9-110,3 м.

Режим водоносного горизонту залежить від кліматичних умов території. Під час весняного сніготанення і сезону дощів можливий підйом рівня ґрунтових вод на 1,5-2,0 м, а в межінь – зниження на 0,5 м відносно зафіксованого.

Ділянка належить до потенційно непідтоплених територій.

Сучасні геологічні та інженерно-геологічні процеси і явища на ділянці не встановлені.

Зміни інженерно-геологічних умов ділянки можливі як під час будівництва, так і в період експлуатації будівлі.

Під час будівництва при тривалому перебуванні у відкритому котловані ґрунти можуть піддаватися перезволоженню або морозному здиманню, що приведе до зниження міцності та деформації їх, а тому закладати фундаменти необхідно зразу після проходки котлована і зачистки основи.

При експлуатації будівлі зниження міцності та деформації ґрунтів може відбутися в через замочування їх поверхневими водами та втрат з водопостачальних комунікацій.

Вишукування проводилися за державними стандартами України та державними будівельними нормами [1-12].

Висновки

1. Згідно з класифікацією ДБН А.2.1-1-2008(І) за сукупністю ознак інженерно-геологічні умови на ділянці відносяться до ІІ категорії складності.

2. Згідно з ДБН В.1.1-12-2006 карт ОСР 2004 А, В ділянка вишукувань знаходиться в зоні 5-бальної, а згідно з картою ОСР 2004 С – у зоні 6-бальної сейсмічної інтенсивності.

Ґрунти ділянки за сейсмічними властивостями відносяться до ІІІ категорії.

3. Ґрунти ІГЕ-2, 3, 4 (піски пилуваті та супісок) рекомендуються під стрічкові фундаменти, ІГЕ-5 (пісок дрібний) – під пальові.

4. Ґрунти ІГЕ-1 неоднорідні й основою фундаментів служити не можуть.

5. Рівень ґрунтових вод залежить від погодних умов території.

6. Глибина промерзання ґрунтів максимальна 1,4 м, середня – 0,8 м.

7. При зміщенні габаритів будівлі в плані або суттєвих змін її технічних характеристик інженерно-геологічні умови ділянки повинні уточнюватися.

8. Фізико-механічні властивості грунтів за даними статичного зондування будуть розглянуті у наступному випуску наукового збірника.

Список використаних джерел

1. *ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95).* Ґрунти. Класифікація.

2. *ДСТУ Б В.2.1-3-96 (ГОСТ 30416-96).* Ґрунти. Лабораторні випробування.

3. *ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96).* Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості.

4. *ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96).* Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань.

5. *ДСТУ Б В.2.1-2001.* Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортуванняі зберігання зразків.

6. *ДСТУ Б В.2.1-17:2009.* Основи і підвалини. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей.

7. *ДСТУ Б В.2.1-19:2009.* Основи і підвалини. Ґрунти. Методи лабораторного визначення гранулометричного (зернового) та мікроагрегатного складу.

8. *ДБН А.2.1.1-2008.* Інженерні вишукування для будівництва

9. *ДСТУ Б А.2.4-13:2009.* Умовні графічні зображення та умовні позначки в документації з інженерно-геологічних вишукувань.

10. *ДБН В.1.1-12.2006.* Захист від небезпечних геологічних процесів. Будівництво в сейсмічних районах України.

11. *ДБН В.2.1-10-2009.* Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.

12. *ДБН В.2.2-2-2006.* Навантаження і вплив. Норми проектування.

УДК 664.1-631:34

О.Л. Гуменюк, канд. хім. наук
К.О. Шупило, студент
О.Ю. Семенюк, студент
Ю.С. Зінченко, студент
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВИКОРИСТАННЯ БАРВНИКІВ ВІТЧИЗНЯНИМИ ВИРОБНИКАМИ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

О.Л. Гуменюк, канд. хим. наук
К.О. Шупило, студент
О.Ю. Семенюк, студент
Ю.С. Зинченко, студент
Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРАСИТЕЛЕЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ ПРОИЗВОДИТЕЛЯМИ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

O.L. Humeniuk,
K.O. Shupylo, student
O.Y. Semeniuk, student
Y.S. Zinchenko, student
Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

USE OF FOOD COLORING BY THE DOMESTIC PRODUCERS OF A FOOD'S INDUSTRY

У виробництві харчових продукті широко використовуються харчові барвники (натуральні, ідентичні натуральним та синтетичні) для надання готовим продуктам привабливого естетичного вигляду. Серед харчових барвників, що дозволені до використання в Україні, є такі, що заборонені в країнах ЄС, США, Австралії, Росії та ін. Досліджено широкий асортимент цукерок, кондитерських та деяких молочних виробів, солодких безалкогольних напоїв щодо вмісту барвників. Встановлено відсоткове співвідношення використання в харчових продуктах натуральних та синтетичних барвників, а також відсоток використання вітчизняними виробниками барвників, що є забороненими в деяких зарубіжних країнах.

***Ключові слова**: натуральні та синтетичні харчові барвники, харчові продукти.*

В производстве пищевых продуктов широко используются пищевые красители (натуральные, идентичные натуральным и синтетические) для придания готовым продуктам привлекательного эстетического вида. Среди пищевых красителей, которые разрешены к использованию в Украине, есть запрещенные в странах ЕС, США, Австралии, России и др. Исследован широкий ассортимент конфет, кондитерских и некоторых молочных изделий, сладких безалкогольных напитков относительно содержания красителей. Установлено процентное соотношение использования в пищевых продуктах натуральных и синтетических красителей, а также процент использования отечественными производителями красителей, запрещенных в некоторых зарубежных странах.

***Ключевые слова**: натуральные и синтетические пищевые красители, пищевые продукты.*

Food coloring (natural, identical to natural and synthetic) is widely used in the producing of food products for giving to ready products of attractive aesthetic appearance. Among the food coloring, which is permitted in Ukraine is prohibited in the EU countries, the USA, Australia, Russia and others. A wide assortment of sweets, confectionery and dairy products, soft drinks was studied. It was set the percentage of the natural and synthetic coloring use in food, and percentage of food coloring use by domestic producers that are prohibited in some foreign countries.

***Key words**: natural and synthetic food coloring, food products.*

Постановка проблеми. Відомо, що харчові барвники дуже широко використовуються у виробництві харчових продуктів з головною метою – надати привабливого естетичного вигляду готовому продукту [1]. Найчастіше барвники зустрічаються у цукерках, солодких напоях, джемах, варенні, їх також можна знайти у складі соусів, ковбас, виробів із риби.

Серед барвників є чимало таких, які справляють негативний вплив на здоров'я людини, що було виявлено за роки їх використання як харчових добавок. У Європейських країнах, США, Канаді, Росії вони потрапили під заборону. В Україні дозволено використання деяких барвників, які є забороненими у вищезгаданих країнах [2-10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що як барвники використовують натуральні (природні та ідентичні натуральним), синтетичні і мінеральні речовини [1; 8; 11].

Натуральні (природні) барвники – речовини, які виділені із природних джерел (рослинних або тваринних); ідентичні натуральним – це штучно отримані (мікробіологічним або хімічним способом) препарати натуральних харчових барвників із заданими властивостями і стандартним вмістом основного барвника; мінеральні барвники – це деякі пігменти і метали [1].

Перевагами природних барвників є те, що вони містять біологічно активні, смакові та ароматичні речовини, що надають продуктам не тільки привабливого вигляду, але й природній аромат, смак і додаткову харчову цінність. А їхніми недоліками є низька світлостійкість, невисока стійкість до дії окисників, недостатня термостійкість, невисока забарвлююча здатність (у порівнянні з синтетичними барвниками).

Синтетичні барвники, в порівняння з натуральними, мають технологічні переваги, вони є стійкими до технологічного оброблення, зберігання, надають яскравих кольорів, що легко відтворюються; більшість синтетичних барвників є добре розчинними у воді, але деякі з них утворюють нерозчинні комплекси (лаки) з йонами металів і в такій формі використовуються для забарвлення порошкоподібних продуктів, таблеток, драже, жувальної гумки [1; 9]. До їхніх недоліків відносять відсутність біологічної активності, смакових речовин та вітамінів. Та найбільш неприємним їх недоліком є несприятливий вплив на організм людини: синтетичні барвники викликають харчові алергії, гіперактивність у дітей, впливають на щитовидну залозу, канцерогенні та справляють інші негативні ефекти на здоров’я та самопочуття людини [10]. У зв’язку з цим у Європейських країна, США, Канаді, Австралії, Росії на деякі барвники є заборона, в той же час в Україні вони дозволені до використання (табл. 1).

Таблиця 1

Харчові барвники, заборонені до використання в деяких країнах, але дозволені в Україні

Код	Країни, в яких барвник заборонений
Е 102, Тартразин	Швейцарія
Е 104, Жовтий хіноліновий	США, Японії, Норвегія
Е 110, Жовтий "сонячний захід"	Норвегія, Фінляндія, США та багато ін.
Е 120, Кармін	Італія
Е 122, Азорубін	Японія, Канада, США, Австрія, Швеція
Е 124, Понсо 4R	США, Норвегія, Фінляндія та ін.
Е 129, Червоний 2G	9 країн Європи
Е 131, Синій патентований	Австралія, США, Норвегія
Е 133, Синій блискучий	Бельгія, Франція, Данія, Норвегія, Германія та деякі ін.
Е 152, Вугілля синтетичне	Країни ЄС, США та деякі ін.
Е 153, Вугілля рослинне	США, Росія, країни ЄС
Е 160 с, Олієсмоли паприки	Австралія
Е 175, Золото	Австралія, Росія
Е 181, Таніни харчові	Австралія

Згідно з дослідженням британських фахівців з університету Саутгемптон, штучні харчові барвники (Е 122, Е 102, Е 104, Е 124, Е 129, Е 110), що широко використовуються в напоях, печиві, цукерках і морозиві, провокують у дітей гіперактивність, швидку втомлюваність і імпульсивність. У дітей розвивається так званий синдром дефіциту уваги, внаслідок чого страждає їх здатність до читання, засвоєння нових знань. Крім того, ці барвники призводять до алергічних реакцій, які проявляються у вигляді кропивниці, а у астматиків – до приступів задухи.

Постановка завдання. Дослідити, які із барвників найчастіше використовуються вітчизняними виробниками, в яких продуктах присутні заборонені в Європі барвники, а також визначити перспективи подальшого використання харчових барвників.

Виклад основного матеріалу дослідження. Було проаналізовано широкий асортимент цукерок, кондитерської та молочної продукції, солодких безалкогольних напоїв. Отримані дані заносились до таблиць, за якими проводились статистичні розрахунки, що були оформлені у вигляді діаграми. Так було досліджено склад близько 100 найменувань цукерок та близько 40 кондитерських виробів від чотирьох найбільш відомих українських виробників Roshen, "АВК", "Конті", "Світоч" та Чернігівської кондитерської фабрики "Стріла". Серед молочної харчової продукції досліджували склад йогуртів, солодких сирків та морозива відомих виробників "Добряна", "Рудь", "Галичина", "Три ведмеді". Із солодких безалкогольних напоїв проаналізували продукцію, що виробляється в Україні від п'яти відомих брендів (табл. 2).

Таблиця 2

Результати досліджень деяких харчових продуктів щодо вмісту барвників

Назва продукту	Виробник	Природні барвники	Синтетичні барвники
Цукерки "Малібу"	ROSHEN м. Київ	Е 163 – антоціани, Е 100 – куркумін, Е 120 – кармін	Е 132 – індигокармін, Е 171 – титану діоксид
Цукерки "Белісімо"	"Конті" м. Донецьк	-	Е 122 – кармуазин
Сластики "Жувійленд"	"АВК" м. Харків	Е 100 – куркумін, Е 120 – кармін, Е 140 – хлорофіл	-
Морські камінці	"Стріла" м. Чернігів	-	Е 133 – синій блискучий FCF, Е 102 – тартразин, Е 122 – кармуазин, Е 124 – понсо, Е 132 – індигокармін, Е 121 – червоний цитрусовий
Торт "Київський"	ROSHEN	Е 100 – куркумін, Е 120 – кармін	Е 132 – індигокармін
Рулет	"Конті" м. Донецьк	Е 150а – цукровий колер I, Е 160а – каротини	Е 122 – кармуазин
Торт "Бджілка"	"Кравест"	-	Е 102 – тартразин
Торт "Да Вінчі"	"Альянс Маркет" м. Чернігів	-	Е 102 – тартразин, Е 124 – понсо 4R
Вода питна "Тархун"	"Малбі Беверідж" м. Черкаси	-	Е 102 – тартразин, Е 133 – синій блискучий FCF
Вода питна "Фанта"	The Coca-Cola Company смт. Велика Димерка	Синтетичний бета-каротин	-
Вода питна "Coca-Cola"	The Coca-Cola Company смт. Велика Димерка	Е 150d – цукровий колер IV	-
Тархун	"№ 1" м.Черкаси	-	Е 102 – тартразин, Е 133 – синій блискучий FCF
Байкал	"Бон Буасон" м. Дніпропетровськ	Е 150 – цукровий колер	-

У результаті отримали такі дані (рис.): у цукерках використовуються натуральні барвники – 50 %; синтетичні – 43 % і мінеральні – 7 %. Серед них виявили 38 % барвників, заборонених в інших країнах. У проаналізованих кондитерських виробах, таких як торти, кекси, рулети виявили таке співвідношення барвників: 58 % – натуральні барвники; синтетичні – 42 %, серед них заборонених 33 %.

Результати аналізу молочних продуктів, таких як сирки, йогурти та морозиво показали, що у виробництві цих продуктів використовуються натуральні барвники.

Дослідження безалкогольних солодких напоїв, показали, що використання синтетичних і природних барвників становить відповідно 50 % на 50 %; серед синтетичних барвників – 38 % заборонених.

Рис. Співвідношення вмісту натуральних та синтетичних барвників та частка використання заборонених у деяких країнах харчових барвників

Висновки. У результаті проведених досліджень було встановлено таке:

– у харчових продуктах вітчизняного виробництва використання природних барвників щодо синтетичних складає 55 %×45 %;

– в Україні на законодавчому рівні дозволені деякі небезпечні барвники, що є забороненими не тільки в США, Євросоюзі та ін. країнах, але і Росії;

– серед синтетичних барвників, що використовуються вітчизняними виробниками частка заборонених в інших країнах становить 36,3 %.

У зв'язку з отриманими результатами були визначені перспективи використання харчових барвників, а саме: розробка нових торгових препаратів з підвищеною світловою і температурною стійкістю з використанням різноманітних технологічних прийомів: суспензії і емульсій природних барвників; мікрокапсульовані форми натуральних барвників і т. д.

Список використаних джерел

1. *Нечаев А. П.* Пищевые добавки : учебник / А. П. Нечаев, А. А. Кочеткова, А. Н. Зайцев. – М. : Колос, 2001. – 342 с.

2. *Food* additive user's handbook. Edited by fim Smith, Blackie. Academic& Professional. – London : UK, 1996. – 286 p.

3. *Flavouring* substances and natural sources of flavourings. – Vol. 1. – Strasbourg, 1992. – 630 c.

4. *Токсикологічна* оцінка окремих харчових добавок та забруднюючих домішок. Серія 32. – Женева : ВООЗ, 1993.

5. *Європейські* вимоги до харчових добавок : довідник. – Львів : Ленорам, 1997. – 126 с.

6. *Про затвердження* переліку харчових добавок, дозволених для використання у харчових продуктах : Постанова Кабінету Міністрів України № 12 від 4 січня 1999 р.

7. *Про внесення* змін до переліку харчових добавок, дозволених для використання у харчових продуктах : Постанова Кабінету Міністрів України № 342 від 17 лютого 2002 р.

8. *Смоляр В. І.* Проблеми використання харчових добавок в Україні / В. І. Смоляр // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції / НУХТ. – К., 1998. – С. 53

9. *Смирнов Е. В.* Синтетические пищевые красители / Е. В. Смирнов, А. К. Береснева // Пищевая промышленность. – 1998. – № 7. – С. 44-46.

10. *К оценке* опасности применения синтетических пищевых красителей / Н. А. Попович и др. // Современные проблемы токсикологии. – 2000. – № 2. – С. 33-39.

11. *Справочник* терминов и ингредиентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://vitamax.dp.ua/?ingr_338.

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО «ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ. СЕРІЯ "ТЕХНІЧНІ НАУКИ"»

Вимоги щодо підготовки рукописів статей для публікації у «Віснику Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки"», який внесено до Переліку наукових фахових видань ВАК України, затвердженого постановою Президії ВАК України від 1 липня 2010 року № 1-05/5 (Бюлетень ВАК України № 7, 2010).

Шановні дописувачі!

Спочатку просимо надіслати Вашу статтю, рецензію та довідку про автора (ів), оформлені за наведеними нижче вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією «Вісника Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки"». Після отримання позитивного відгуку прохання сплатити вартість статті і надсилати весь пакет документів до відділу науково-дослідної частини ЧДТУ.

У зв'язку з включенням «Вісника Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки"» до міжнародної наукометричної бази даних eLIBRARY.RU просимо Вас звернути увагу на деякі зміни в пакеті документів.

1. Для публікації статті у «Віснику Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки"» необхідно в обов'язковому порядку подати:

– електронний варіант статті, оформленої за зразком (Додаток А);

– рецензію на статтю за підписом доктора наук;

– довідку про авторів, заповнену за наведеним бланком (Додаток Б). Звертаємо Вашу увагу, що ім'я та по батькові автора(ів) подаються повністю;

– квитанцію про сплату вартості публікації наукової статті (Додаток В);

– згоду на публікацію у формі договору про передачу права на використання твору (бланк договору розміщено на сайті університету).

2. Вимоги до наукової статті. Наукова стаття повинна відповідати тематичному спрямуванню збірника.

Статтю можна подавати однією з трьох мов: українською, російською, англійською.

Обсяг статті повинен бути таким: мінімум – 5 повних сторінок, максимум – 10 сторінок (остання сторінка має бути заповнена не менш ніж на 3/4).

Стаття подається як у роздрукованому вигляді, так і в електронному варіанті на оптичному диску CD (DVD) або надсилається електронною поштою на адресу: ndchbm@mail.ru. Текст статті набирається з використанням комп'ютерних текстових редакторів Word for Windows 97/2000/XP.

3. Структура статті. До друку у «Віснику Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки"» приймаються лише наукові статті, які мають такі необхідні елементи: УДК. Автори. Назва наукової або освітньої установи, де працюють автори. Назва статті. Анотації. Ключові слова **(у зв'язку з включенням до міжнародної наукометричної бази даних eLIBRARY.RU вся інформація про авторів, назва статті, анотація і ключові слова подається трьома мовами: українською, російською, англійською).** Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Мета статті. Виклад основного матеріалу. Висновки і пропозиції. Список використаних джерел.

4. Параметри сторінки повинні бути такими:

Формат А4 (210×297 мм).

Поля: верхнє, нижнє та бокові – 25 мм.

Відступ від верхнього та нижнього колонтитула – 25 мм.

Верхній і нижній колонтитули, а також номери сторінок не вводити. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ У СТАТТІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ РОЗСТАНОВКИ ПЕРЕНОСІВ ТА АВТОМАТИЧНИХ СПИСКІВ. УСІ СПИСКИ ПРОСТАВЛЯЮТЬСЯ У РУЧНОМУ РЕЖИМІ!

5. Вимоги до оформлення структурних елементів статті.

5.1. ***УДК*** – шрифт Times New Roman (кегель 12), курсив, вирівнювання по лівому краю без абзацу.

Автори – ***ініціали та прізвище*** кожного автора починати з нового рядка (шрифт Times New Roman (кегель 12), розміщення по лівому краю, без абзацного відступу, напівжирний), ***науковий ступінь або посада, якщо немає ступеня*** (шрифт Times New Roman (кегель 12), звичайний). Скорочення слід подавати згідно з ДСТУ 3582-97 "Скорочення слів в українській мові у бібліографічному описі. Загальні правила та вимоги" (наприклад: д-р екон. наук; канд. техн. наук; тис., млн, млрд; грн, дол; табл., рис. тощо). Дані про авторів подаються трьома мовами

Назва організації – місце (я) роботи автора (-ів) (вирівнювання по лівому краю без абзацного відступу, шрифт Times New Roman (кегель 10)). Після назви організації через кому вказуються місто та країна розміщення організації (трьома мовами).

Назва статті – шрифт Times New Roman (кегель 12). Подається прописними напівжирними літерами, вирівнювання по центру без абзацу, трьома мовами.

Анотація – шрифт Times New Roman (кегель 9), курсив, вирівнювання по ширині, абзацний відступ 0,63 см, одинарний інтервал. В анотації має бути чітко сформульована головна ідея статті та коротко обґрунтована її актуальність (обсяг – 8-10 рядків). У статті подаються анотації трьома мовами: українською, російською, англійською (Додаток А).

Ключові слова – шрифт Times New Roman (кегель 9), вирівнювання по ширині, абзацний відступ 0,63 см, одинарний інтервал. Ключові слова подаються трьома мовами. Кількість ключових слів – 5-7 (Додаток А).

Основний текст – текст статті з заголовками (вирівнювання по ширині, абзац – 0,63 см, шрифт Times New Roman (кегель 12), одинарний інтервал).

Розділи статті (Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Мета статті. Виклад основного матеріалу. Висновки і пропозиції. Список використаних джерел) зазначаються таким шрифтом: Times New Roman, кегель 12, напівжирний, звичайний. Після назви розділу статті ставиться крапка і продовжується текст самої статті.

5.2. Інтервали між елементами статті такі:

– УДК – автори – 1;
– автори – назва організації – 1;
– назва організації – назва статті – 2;
– назва статті – анотація – 1;
– анотація – ключові слова – 1;
– ключові слова – основний текст – 1;
– основний текст – назва таблиці (верхній край рисунка) – 1;
– назва таблиці – її верхній край (нижній край рисунка – їхні назви) – 1;
– нижній край таблиці (назва рисунка) – основний текст – 1;
– основний текст – список використаних джерел – 1;
– список використаних джерел – перелік джерел – 1.

6. Цитати, таблиці, статистичні дані, цифрові показники, що підвищують рівень аналітичних матеріалів, подаються з посиланням на джерела. Таблиці мають бути пронумеровані й мати заголовок. Відповідальність за наведені показники несе автор.

Рисунки і таблиці необхідно подавати у статті безпосередньо після тексту, де вони згадані вперше, або на наступній сторінці.

6.1. Ілюстрації (рисунки та чорно-білі фотографії)

Під час виконання рисунків рекомендується використання Microsoft Visio 2007 (2003). За умови використання закладеної графіки Microsoft Word рисунки повинні бути згрупованими. Шрифт рисунків Times New Roman, кегель 12, курсив.

Рисунки позначають словом "Рис." і нумерують послідовно в межах статті. Якщо у статті є лише один рисунок, він не нумерується. Пояснювальні підписи, номер рисунка, його назву розміщують послідовно під ілюстрацією.

Наприклад:

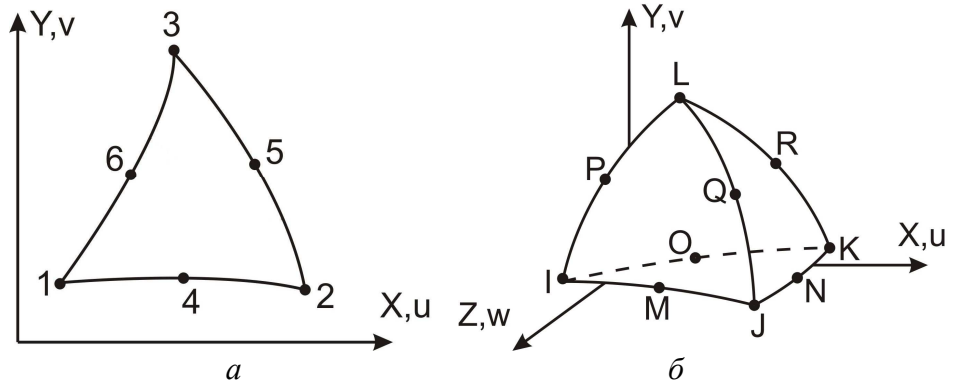


Рис. 3. Види скінченних елементів:
а – 6-вузловий плоский скінченний елемент і б – 10-вузловий об'ємний скінченний елемент

6.2. Таблиці

Цифровий матеріал, що наводиться у статті, як правило, повинен оформлятися у вигляді таблиць.

Розмір тексту таблиць – кегель 12. Усі таблиці повинні мати заголовки. Нумераційний заголовок таблиць (кегель 12) вирівнюють по правому краю таблиці, тематичний заголовок таблиці (по центру, кегель 12, курсив).

Наприклад:

Таблиця 1

Граничні значення режимів різання

№ досл.	$V_к$, м/с	$V_{дет}=V_к/60$	t, мм	$Q_{гр}$, мм^2/с	a_z, мкм	$a_{z\ max}$	$n/n_{різ}$
1	20	333	0,033	11	5,32	10,17	10/6
2	40	667	0,033	13	3,04	5,83	11/7
3	60	1000	0,028	18	2,01	3,78	15/10
4	80	1333	0,026	26	1,64	3,07	19/12
5	90	1500	0,025	38	1,59	2,84	25/16

Якщо таблиця не вміщується на одній сторінці, всі її колонки нумерують, а над перенесеною частиною таблиці справа надписують: "Закінчення табл. 1".

6.3. Формули

Використовуючи формули, необхідно дотримуватися певних правил.

Великі, довгі та громіздкі формули, які мають у складі знаки суми, добутку, диференціювання, інтегрування, розміщують на окремих рядках. Це стосується також і всіх нумерованих формул. Для економії місця кілька коротких однотипних формул, відокремлених від тексту, можна подати в одному рядку, а не одну під одною. Невеликі і нескладні формули, що не мають самостійного значення, вписують усередині рядків тексту.

Стиль формул: хімічні формули набирають прямим шрифтом. Формули, на які є посилання, нумерують арабськими цифрами в круглих дужках праворуч. Обов'язково подають розшифровку літерних позначень величин у формулах. Для набору позначень фізичних величин використовують редактор формул Microsoft Equation для WINDOWS.

Номер формули проставляється справа в кінці рядка в круглих дужках, не виходячи за поле. Формули необхідно вирівнювати по лівому краю сторінки. Між ними та текстом витримується інтервал в один рядок.

Наприклад:

Пропонується зношення круга визначати пропорційним кількості зрізів більших граничного значення $(a_z)_{max}$:

$$Q_a(a_z) = C_1 \cdot a_z^{k_1} \cdot F(a_z) + C_2 \cdot a_z^{k_2} (1 - F(a_z)), \quad (1)$$

де $k_1<1$, $k_2>1$ – показники ступенів при товщині зрізу;

$F(a_z)$, $(1–F(a_z))$ – значення інтегральної функції розподілення розрахункової товщини зрізів, котрі визначають частку товщини зрізів, менших та більших вказаного граничного значення a_z. Інтегральна функція розподілу ймовірностей товщини стружок була знайдена за моделлю процесу шліфування в роботі [7].

7. Список використаних джерел необхідно складати за вимогами, що висуваються до оформлення списку використаних джерел у дисертаційних роботах (Бюлетень ВАК України № 5, 2009).

Заголовок “Список використаних джерел” слід розміщувати посередині рядка, шрифт Times New Roman, кегель 12, напівжирний, а список джерел – 11 кегель.

8. Оплата публікації. Опублікування наукових статей у «Віснику Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”» є платним. Вартість публікації 1 сторінки наукової статті становить **50 грн** (прохання обов’язково уточнювати вартість публікації). Оплата підтверджується квитанцією, зразок якої наведений у Додатку В.

9. Контактна інформація.

Матеріали необхідно надсилати на адресу: 14027, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 242 (науково-дослідна частина). Всі документи, що містять підписи та печатки, повинні бути відсканованими.

Контактні особи: Подимова Людмила Анатоліївна.

Робочий тел.: (04622) 3-42-44.

E-mail: ndchbm@mail.ru.

Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи, що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.

Додаток А
Приклад оформлення статті

УДК 621.3.05

О.В. Будьонний, канд. техн. наук
М.А. Прокопець, магістр
Є.Ю. Коваленко, магістр
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

А.В. Будённый, канд. техн. наук
М.А. Прокопец, магистр
Е.Ю. Коваленко, магистр
НТУУ «КПИ», м. Киев, Украина

БЕСКОНТАКТНАЯ ЗАРЯДКА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Oleksandr Budyonny, PhD in Technical Sciences
Maryna Prokopets, master
Yevhen Kovalenko, master
NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine

CONTACTLESS CHARGING BATTERIES

Пропонується використання безконтактного заряду акумуляторних батарей на основі теорії теслівських процесів для передачі енергії без дротів на невеликі відстані. Розрахунок енергетичних параметрів схеми передачі енергії проводився методом часткових ємностей між передавальними та приймальними антенами з урахуванням крайових ефектів. Проведено аналіз залежності струму та напруги навантаження від таких факторів: зміщення розташування пристрою, який заряджається, відносно центру блоку підзарядки; відстані між передавальними та приймальними антенами; значення індуктивності в навантаженні; робочої частоти.

Ключові слова: *безконтактна зарядка, батареї, процеси, енергія.*

Предлагается использование бесконтактного заряда аккумуляторных батарей на основе теории тесловских процессов для передачи энергии без проводов на небольшие расстояния. Расчет энергетических параметров схемы передачи энергии проводился методом частичных емкостей между передаточными и приемными антеннами с учетом краевых эффектов. Проведен анализ зависимости тока и напряжения нагрузки от таких факторов: смещение расположения устройства, которое заряжается, относительно центра блока подзарядки; расстояния между передающими и приемными антеннами; значение индуктивности в нагрузке; рабочей частоты.

Ключевые слова: *бесконтактная зарядка, батареи, процессы, энергия.*

The use of noncontact charge of storage batteries is offered on the basis of theory of Tesla processes for the transmission of energy without wires on small distances. The calculation of power parameters of chart of transmission of energy was conducted the method of partial capacities between transmission and receiving aerials taking into account edge effects. The analysis of dependence of current and tension of loading is conducted from such factors: displacement of location of device, what recharging, in relation to the center of subcharging block; distances are between transmission and receiving aerials; a value of inductance is in loading; working frequency.

Key words: *noncontact charge, batteries, processes, energy.*

Постановка проблеми. …

Аналіз останніх досліджень і публікацій. …

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. …

Мета статті. Головною метою цієї роботи є …

Виклад основного матеріалу. …

Висновки і пропозиції. …

Список використаних джерел

1. Основные источники электромагнитных полей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ecololife.ru/study-539-1.html.
2. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982. – 622 с.
3. Пентегов И. В. О возможности беспроводной передачи энергии с помощью тесловских процессов / И. В. Пентегов, А. Л. Приступа // Техническая электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 11-15.
4. ….
5. ….

Додаток Б

Бланк для оформлення довідки про автора

ДОВІДКА ПРО АВТОРІВ

Дані про авторів	Українською мовою	Російською мовою	Англійською мовою
Прізвище			
Ім’я			
По батькові			
Науковий ступінь			
Вчене звання			
Почесне звання			
Місце роботи			
Посада			
Назва статті			
Обсяг статті			
Поштова адреса, на яку необхідно надсилати примірник збірника			
Контактна інформація	роб. тел.		
	дом. тел.		
	моб. тел.		
	e-mail		

Додаток В

Бланк квитанції для оплати публікації

Заява на переказ готівки

Дт **1002** Ідентифікаційний код 05460798

Кт 31258201206996

Одержувач платежу ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Дата здійснення операції _____

Дата валютування _____

Код установи банку 853592

Найменування установи банку ГУДК. Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника _____

_____

Адреса платника _____

Призначення платежу за видання у збірнику 25010200

Сума _____

Загальна сума _____ (словами)

Касир

Підпис платника _____

Квитанція

Дт **1002** Ідентифікаційний код 05460798

Кт 31258201206996

Одержувач платежу ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Дата здійснення операції _____

Дата валютування _____

Код установи банку 853592

Найменування установи банку ГУДК. Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника _____

_____

Адреса платника _____

Призначення платежу за видання у збірнику 25010200

Сума _____

Загальна сума _____ (словами)

Касир

Підпис платника _____

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 2 (65)

Головний редактор	В.В. Казимир
Відповідальний за випуск	О.І. Пилипенко
Літературний редактор	Л.М. Сила
Коректор	О.С. Смєлова
Комп'ютерна верстка і макетування	В.М. Олефіренко
	Т.В. Коваленко

Підписано до друку 05.11.2013. Формат 60x84/8. Друк різографія.
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. – 29,6 Обл.-вид. арк. – 14,9.
Тираж 300 пр. Замовлення № 194/13.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського державного технологічного університету
14027, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції.
Серія ДК № 840 від 04.03.2002 р.